目　录

第一部分　力学综合

专题一　力与运动 …… 2

1. 2017 年全国理综Ⅰ卷第 21 题 …… 2
2. 2017 年海南物理卷第 9 题 …… 4
3. 2019 年辽宁模拟卷 …… 6
4. 2016 年浙江理综卷第 20 题 …… 7
5. 2015 年全国新课标Ⅰ卷第 18 题 …… 9
6. 2014 年全国新课标Ⅰ卷第 20 题 …… 11
7. 2015 年甘肃模拟卷 …… 12
8. 2019 年北京理综卷第 24 题 …… 14
9. 2015 年海南物理卷第 14 题 …… 16

专题二　多过程的运动问题 …… 18

1. 2019 年全国理综Ⅲ卷第 20 题 …… 18
2. 2014 年江苏物理卷第 8 题 …… 20
3. 2017 年海南物理卷第 14 题 …… 22
4. 2016 年全国理综卷Ⅰ第 25 题 …… 24
5. 2018 年全国理综Ⅲ卷第 12 题 …… 27
6. 2019 年全国理综Ⅱ卷第 25 题 …… 29
7. 2015 年全国理综Ⅱ卷第 25 题 …… 32
8. 2017 年新课标理综Ⅲ卷第 25 题 …… 34
9. 2017 年全国理综Ⅰ卷第 25 题 …… 36
10. 2017 年全国理综Ⅱ卷第 25 题 …… 39

专题三　万有引力与航天 …… 41

1. 2014 年新课标理综Ⅰ卷第 19 题 …… 41
2. 2018 年北京理综卷第 17 题 …… 43
3. 2018 年新课标理综Ⅰ卷第 20 题 …… 44
4. 2015 年安徽理综卷物理第 24 题 …… 45

专题四　功和能 …… 48

1. 2015 年江苏物理卷第 9 题 …… 48
2. 2015 年新课标理综Ⅰ卷第 17 题 …… 50
3. 2017 年江苏物理卷第 9 题 …… 52
4. 2016 年浙江模拟卷 …… 54

5. 2016 年浙江模拟卷…………………………………………………………………… 56
6. 2018 年 11 月浙江选考卷第 20 题…………………………………………………… 58
7. 2015 年广东理综卷第 36 题 ………………………………………………………… 60
专题五　碰撞和动量 ……………………………………………………………………… 62
1. 2019 年湖南模拟题…………………………………………………………………… 62
2. 2016 年北京理综卷第 24 题 ………………………………………………………… 64
3. 2016 年 10 月浙江选考卷第 23 题…………………………………………………… 67
4. 2019 年全国理综Ⅰ卷第 25 题 ……………………………………………………… 70
5. 2019 年全国理综Ⅲ卷第 25 题 ……………………………………………………… 73

第二部分　电学综合

专题六　电路分析 ………………………………………………………………………… 76
1. 2016 年江苏物理卷第 8 题…………………………………………………………… 76
2. 2014 年上海物理卷第 18 题 ………………………………………………………… 77
3. 2016 年全国理综Ⅱ卷第 17 题 ……………………………………………………… 78
4. 2017 年北京理综卷第 19 题 ………………………………………………………… 80
专题七　电场与磁场 ……………………………………………………………………… 81
1. 2017 年全国理综Ⅲ卷第 18 题 ……………………………………………………… 81
2. 2015 年浙江模拟卷…………………………………………………………………… 83
3. 2016 年上海模拟卷…………………………………………………………………… 85
4. 2017 年新课标理综Ⅲ卷第 21 题 …………………………………………………… 86
5. 2019 年江苏物理卷第 9 题…………………………………………………………… 88
6. 2015 年山东理综卷第 20 题 ………………………………………………………… 90
7. 2016 年 10 月浙江选考卷第 10 题…………………………………………………… 92
8. 2019 年全国理综Ⅲ卷第 18 题 ……………………………………………………… 93
9. 2017 年 11 月浙江选考卷第 23 题…………………………………………………… 94
10. 2016 年浙江理综卷第 25 题………………………………………………………… 96
11. 2018 年江苏物理卷第 23 题………………………………………………………… 99
12. 2018 年 11 月浙江选考卷第 23 题 ………………………………………………… 101
13. 2019 年 4 月浙江选考卷第 23 题…………………………………………………… 105
14. 2019 年江苏物理卷第 16 题………………………………………………………… 107
15. 2017 年江苏物理卷第 23 题………………………………………………………… 109
16. 2018 年全国理综Ⅱ卷第 12 题……………………………………………………… 111
17. 2018 年全国理综Ⅰ卷第 25 题……………………………………………………… 113
18. 2018 年北京理综卷第 24 题………………………………………………………… 116
专题八　电磁感应与交变电流 …………………………………………………………… 118
1. 2014 年江苏模拟卷…………………………………………………………………… 118
2. 2013 年四川理综卷第 7 题…………………………………………………………… 120
3. 2017 年海南物理卷第 10 题 ………………………………………………………… 122

4. 2015 年上海物理卷第 20 题 …… 124
5. 2014 年浙江模拟卷 …… 126

第三部分　力电综合

专题九　带电粒子在复合场中的运动 …… 128
1. 2016 年四川物理卷第 14 题 …… 128
2. 2015 年福建理综卷第 22 题 …… 132
3. 2015 年北京理综卷第 24 题 …… 134
4. 2015 年上海理综卷第 33 题 …… 136
专题十　电磁感应与力学综合 …… 138
1. 2016 年新课标理综Ⅲ卷第 25 题 …… 138
2. 2016 年上海物理卷第 33 题 …… 141
3. 2019 年 4 月浙江选考卷第 22 题 …… 142
4. 2019 年天津理综卷第 11 题 …… 144
5. 2017 年北京理综卷第 24 题 …… 146
6. 2017 年天津理综卷第 12 题 …… 149
7. 2017 年上海物理卷第 20 题 …… 151
8. 2018 年天津理综卷第 12 题 …… 153
9. 2018 年 4 月浙江选考卷第 23 题 …… 155

第四部分　物理实验

专题十一　力学实验 …… 160
1. 2019 年全国理综Ⅰ卷第 22 题 …… 160
2. 2015 年福建理综卷第 19 题 …… 162
3. 2015 年山东理综卷第 21 题 …… 164
4. 2016 年全国理综Ⅲ卷第 23 题 …… 167
5. 2017 年江苏物理卷第 10 题 …… 170
6. 2016 年江苏物理卷第 11 题 …… 173
7. 2019 年北京理综卷第 21 题 …… 176
专题十二　电学实验 …… 179
1. 2019 年江苏物理卷第 11 题 …… 179
2. 2015 年浙江理综卷第 22 题 …… 183
3. 2015 年四川理综卷第 8 题 …… 185
4. 2019 年全国理综Ⅲ卷第 23 题 …… 188
5. 2013 年山东理综卷第 21 题 …… 191
专题十三　设计实验 …… 194
1. 2017 年全国理综Ⅱ卷第 22 题 …… 194
2. 2017 年全国理综Ⅱ卷第 23 题 …… 196

第五部分　选考模块

专题十四　选考模块 …… 200
1. 2017 年 4 月浙江选考卷第 15 题 …… 200
2. 2015 年上海物理卷第 9 题 …… 202
3. 2014 年重庆理综卷第 11 题 …… 203
4. 2016 年 10 月浙江选考卷第 15 题 …… 204
5. 2017 年 4 月浙江选考卷第 16 题 …… 205
6. 2016 年 4 月浙江选考卷第 21 题 …… 207
考点伸展参考答案 …… 209

第一部分
力学综合

专题一　力与运动

1. 2017 年全国理综Ⅰ卷第 21 题

如图 1-1-1 所示，柔软轻绳 ON 的一端 O 固定，其中间某点 M 拴一重物，用手拉住绳的另一端 N。初始时，OM 竖直且 MN 被拉直，OM 与 MN 之间的夹角为 $\alpha\left(\alpha>\frac{\pi}{2}\right)$。现将重物向右上方缓慢拉起，并保持夹角 α 不变。在 OM 由竖直被拉到水平的过程中（　　）。

A. MN 上的张力逐渐增大

B. MN 上的张力先增大后减小

C. OM 上的张力逐渐增大

D. OM 上的张力先增大后减小

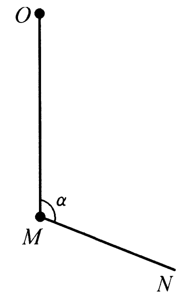


图 1-1-1

思路点拨

本题考查共点力的平衡条件，这类问题一般要抓住不变的量，然后去分析变化的量。在本题中，研究对象是小球，任一时刻小球都要被视作平衡状态，在全过程中小球受到重力和绳子的拉力作用。在全过程中小球的重力大小和方向都不变，这是一个关键点，另一个关键点是重物向右上方缓慢拉起，并保持夹角 α 不变，根据这两个点利用平衡条件去分析另外两个力的变化情况，对于三力平衡的问题一般利用矢量三角形分析比较方便。

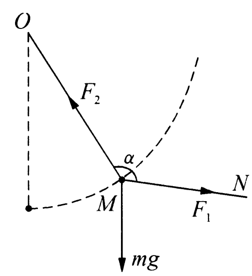


图 1-1-2

分析解答

以重物为研究对象进行受力分析，受重力 mg，OM 上的拉力为 F_2、MN 上的拉力为 F_1，如图 1-1-2 所示。重物向右上方缓慢拉起过程中可视为平衡状态，根据平衡条件这三个力矢量构成封闭的矢量三角形，如图 1-1-3 所示，重物向右上方缓慢拉起过程中保持夹角 α 不变，则对应的力矢量三角形中，角 β 保持不变，物体所受力重力大小、方向均不变，在 OM 由竖直被拉到水平的过程中，根据几何知识可知该力矢量三角形变化如图 1-1-4 所示，OM 上的作用力 F_2

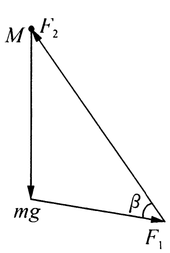


图 1-1-3

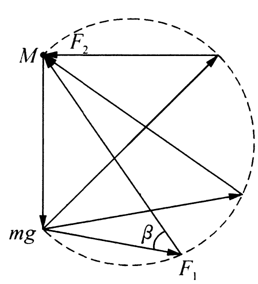


图 1-1-4

先变大后变小，MN 上的拉力为 F_1 一直变大，当 OM 转到水平方向时，恰好达到最大。故本题正确选项为 AD。

考点伸展

1.（2019 年全国理综Ⅰ卷）如图 1-1-5 所示，一粗糙斜面固定在地面上，斜面顶端装有一光滑定滑轮。一细绳跨过滑轮，其一端悬挂物块 N，另一端与斜面上的物块 M 相连，系统处于静止状态。现用水平向左的拉力缓慢拉动 N，直至悬挂 N 的细绳与竖直方向成 45°。已知 M 始终保持静止，则在此过程中（　　）。

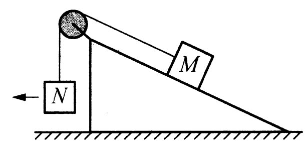


图 1-1-5

A. 水平拉力的大小可能保持不变

B. M 所受细绳的拉力大小一定一直增加

C. M 所受斜面的摩擦力大小一定一直增加

D. M 所受斜面的摩擦力大小可能先减小后增加

2. 2017 年海南物理卷第 9 题

如图 1－2－1 所示，水平地面上有三个靠在一起的物块 P、Q 和 R，质量分别为 m、$2m$ 和 $3m$，物块与地面间的动摩擦因数都为 μ。用大小为 F 的水平外力推动物块 P，记 R 和 Q 之间相互作用力与 Q 与 P 之间相互作用力大小之比为 k。下列判断中正确的是（　　）。

A. 若 $\mu \neq 0$，则 $k=\frac{5}{6}$

B. 若 $\mu \neq 0$，则 $k=\frac{3}{5}$

C. 若 $\mu = 0$，则 $k=\frac{1}{2}$

D. 若 $\mu = 0$，则 $k=\frac{3}{5}$

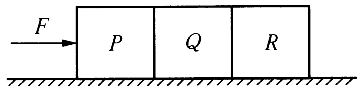


图 1－2－1

思路点拨

本题考查了牛顿第二定律知识点，在近几年的各省高考题中出现的频率较高，常与整体法与隔离法等知识点交汇命题。分 $\mu \neq 0$ 与 $\mu = 0$ 两种情况，根据牛顿第二定律分别求出整体加速度，再用隔离法分别表示出 R 和 Q 之间相互作用力与 Q 与 P 之间相互作用力大小，求得 k 值分析即可。

分析解答

若 $\mu \neq 0$，对整体，根据牛顿第二定律有：$F-\mu(m+2m+3m)g=(m+2m+3m)a$，解得：$a=\frac{F}{(m+2m+3m)}-\mu g$，以 Q 与 R 为研究对象，根据牛顿第二定律有：$F_1-\mu(2m+3m)g=(2m+3m)a$，解得：$F_1=\frac{5}{6}F$，以 R 为研究对象，根据牛顿第二定律有：$F_2-3\mu mg=3ma$，解得：$F_2=\frac{F}{2}$，则 R 和 Q 之间相互作用力 F_2 与 Q 与 P 之间相互作用力 F_1 大小之比 $k=\frac{F_2}{F_1}=\frac{3}{5}$，选项 A 错误，选项 B 正确；若 $\mu=0$，根据牛顿第二定律有：$F=(m+2m+3m)a'$，解得：$a=\frac{F}{6m}$，以 Q 与 R 为研究对象，根据牛顿第二定律有：$F_1'=(2m+3m)a'$，解得：$F_1'=\frac{5}{6}F$，以 R 为研究对象，根据牛顿第二定律有：$F_2'=3ma'$，解得：$F_2'=\frac{F}{2}$，则 R 和 Q 之间相互作用力 F_2' 与 Q 与 P 之间相互作用力 F_1' 大小之比 $k=\frac{F_2'}{F_1'}=\frac{3}{5}$，选项 C 错误，选项 D 正确。故本题正确选项为 BD。

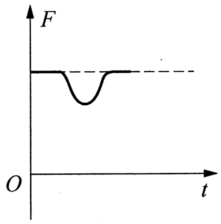
考点伸展

2.（浙江 2018 年 4 月物理选考题）如图 1－2－2 所示，小芳在体重计上完成下蹲动作，下列 $F-t$ 图象中能反应体重计示数随时间变化的是（　　）。

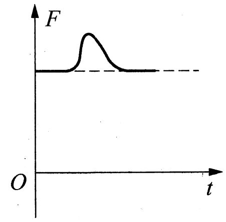


图 1－2－2

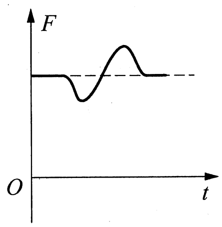
A.



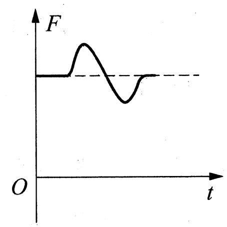
B.



C.



D.



3. 2019 年辽宁模拟卷

如图 1-3-1 所示，水平桌面上放置一个倾角为 45°的光滑楔形滑块 A，一细线的一端固定于楔形滑块 A 的顶端 O 处，细线另一端拴一质量为 $m=0.2$ kg 的小球。若滑块与小球一起以加速度 a 向左做匀加速运动(取 $g=10\ \mathrm{m/s^2}$) 则下列说法中正确的是(　　)。

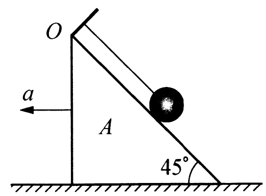


图 1-3-1

A. 当 $a=5\ \mathrm{m/s^2}$ 时，滑块对球的支持力为$\frac{\sqrt{2}}{2}$ N

B. 当 $a=15\ \mathrm{m/s^2}$ 时，滑块对球的支持力为$\frac{\sqrt{2}}{2}$ N

C. 当 $a=5\ \mathrm{m/s^2}$ 时，地面对 A 的支持力一定大于两个物体的重力之和

D. 当 $a=15\ \mathrm{m/s^2}$ 时，地面对 A 的支持力一定小于两个物体的重力之和

思路点拨

本题考查牛顿第二定律的应用、受力分析和正交分解，解题关键在于研究对象的选取和临界状态的确定。当系统以不同的加速度向左匀加速运动时，小球可能会离开斜面，其临界情况是小球仍然位于斜面上，但与斜面之间没有弹力。应用牛顿第二定律解决问题的一般程序是先选定研究对象，对研究对象进行受力分析，再根据加速度的方向正交分解各力，最后列出方程求解。本题在研究滑块与球之间的弹力时，可以选定球作为研究对象，在研究地面与滑块 A 之间的弹力时，可以选择球与滑块组成的系统作为研究对象。

分析解答

设加速度为 a_0 时小球对滑块的压力等于零，对小球受力分析，受重力、拉力，根据牛顿第二定律，有：水平方向：$F_{合}=F\cos 45°=ma_0$；竖直方向：$F\sin 45°=mg$，解得 $a_0=g$。(1) 当 $a=5\ \mathrm{m/s^2}$ 时，小球未离开滑块，水平方向：$F\cos 45°-F_N\cos 45°=ma$；竖直方向：$F\sin 45°+F_N\sin 45°=mg$，解得 $F_N=\frac{\sqrt{2}}{2}$ N，故 A 正确；(2) 当 $a=15\ \mathrm{m/s^2}$ 时，小球已经离开滑块，只受重力和绳的拉力，滑块对球的支持力为零，故 B 错误；(3) 当系统相对稳定后，竖直方向没有加速度，受力平衡，所以地面对 A 的支持力一定等于两个物体的重力之和，故 C，D 错误。故选 A。

考点伸展

3.（2018 年山西模拟题）如图 1-3-2 所示，一细线的一端固定于倾角为 45°的光滑楔形滑块 A 上的顶端 O 处，细线另一端拴一质量为 $m=0.2$ kg 的小球静止在 A 上。若滑块从静止向左匀加速运动时加速度为 a。(取 $g=10\ \mathrm{m/s^2}$)(　　)。

A. 当 $a=5\ \mathrm{m/s^2}$ 时，线中拉力为$\frac{3\sqrt{2}}{2}$ N

B. 当 $a=10\ \mathrm{m/s^2}$ 时，小球受的支持力为$\sqrt{2}$ N

C. 当 $a=12\ \mathrm{m/s^2}$ 时，经过 1 秒钟小球运动的水平位移是 6 m

D. 在稳定后，地面对 A 的支持力一定小于两个物体的重力之和

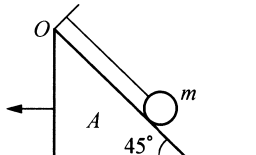


图 1-3-2

4. 2016 年浙江理综卷第 20 题

如图 1-4-1 所示为赛车场的一个“梨形”赛道，两个弯道分别为半径 $R=90\ \text{m}$ 的大圆弧和 $r=40\ \text{m}$ 的小圆弧，直道与弯道相切。大、小圆弧圆心 O、O' 距离 $L=100\ \text{m}$。赛车沿弯道路线行驶时，路面对轮胎的最大径向静摩擦力是赛车重力的 2.25 倍，假设赛车在直道上做匀变速直线运动，在弯道上做匀速圆周运动，要使赛车不打滑，绕赛道一圈时间最短（发动机功率足够大，重力加速度 $g=10\ \text{m/s}^2$，$\pi=3.14$），则（　　）。

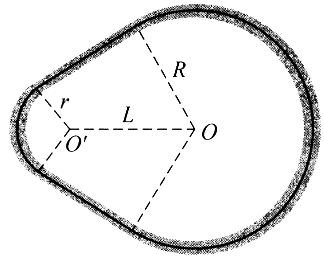


图 1-4-1

A．在绕过小圆弧弯道后加速

B．在大圆弧弯道上的速率为 45 m/s

C．在直道上的加速度大小为 $5.63\ \text{m/s}^2$

D．通过小圆弧弯道的时间为 5.85 s

思路点拨

本题考查匀速圆周运动、向心加速度，难点是匀速圆周运动和牛顿第二定律联立解题。此题的“梨形”赛道中弯道处的向心力由静摩擦力提供，由向心力公式 $F_{向}=m\dfrac{v^2}{r}$ 可知当轨道半径一定时，向心力越大对应的绕行速度越大。所以题中要求绕行时间最短，即绕行的速度最大，因此可以确定在大、小圆轨道上绕行时的最大速度。同时要使直道上的时间最短，从小圆弧到大圆弧的直道需要一直加速。

分析解答

在弯道上做匀速圆周运动时，根据牛顿定律 $kmg=m\dfrac{v_m^2}{r}$，故当弯道半径一定时，在弯道上的最大速度是一定的，且在大弯道上的最大速度大于小弯道上的最大速度，故要想时间最短，可在绕过小圆弧弯道后加速，选项 A 正确；在大圆弧弯道上的速率为 $v_{mR}=\sqrt{kgR}$ 即 $v_{mR}=45\ \text{m/s}$，选项 B 正确；直道的长度为 $x=\sqrt{L^2-(R-r)^2}=50\sqrt{3}\ \text{m}$，在小弯道上的最大速度 $v_{mr}=\sqrt{kgr}=30\ \text{m/s}$，故在直道上的加速度大小为 $a=\dfrac{v_{mR}^2-v_{mr}^2}{2x}\approx 6.50\ \text{m/s}^2$，选项 C 错误；由几何关系可知，小圆弧轨道的长度为 $l=\dfrac{2\pi r}{3}$，通过小圆弧弯道的时间为 $t=\dfrac{l}{v_{mr}}\approx 2.80\ \text{s}$，选项 D 错误。故正确答案是 AB。

考点伸展

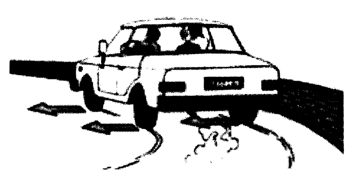


图 1-4-2

4.（2019 年 4 月浙江选考卷）如图 1-4-2 所示，一质量为 $2.0\times10^3\ \text{kg}$ 的汽车在水平公路上行驶，路面对轮胎的横向最大静摩擦力为 $1.4\times10^4\ \text{N}$，当汽车经过半径为 80 m 的弯道时，下

列判断中正确的是(　　)。

A．汽车转弯时所受的力有重力、弹力、摩擦力和向心力

B．汽车转弯的速度为 20 m/s 时所需的向心力为 1.4×10^4 N

C．汽车转弯的速度为 20 m/s 时汽车会发生侧滑

D．汽车能安全转弯的向心加速度不超过 $7.0\ m/s^2$

5. 2015年全国新课标Ⅰ卷第18题

一带有乒乓球发射机的乒乓球台如图1-5-1所示。水平台面的长和宽分别为 L_1 和 L_2，中间球网高度为 h。发射机安装于台面左侧边缘的中点，能以不同速率向右侧不同方向水平发射乒乓球，发射点距台面高度为 $3h$。不计空气的作用，重力加速度大小为 g。若乒乓球的发射速率 v 在某范围内，通过选择合适的方向，就能使乒乓球落到球网右侧台面上，则 v 的最大取值范围是(　　)。

A. $\frac{L_1}{2}\sqrt{\frac{g}{6h}}<v<L_1\sqrt{\frac{g}{6h}}$

B. $\frac{L_1}{4}\sqrt{\frac{g}{h}}<v<L_1\sqrt{\frac{(4L_1^2+L_2^2)g}{6h}}$

C. $\frac{L_1}{2}\sqrt{\frac{g}{6h}}<v<\frac{L_1}{2}\sqrt{\frac{(4L_1^2+L_2^2)g}{6h}}$

D. $\frac{L_1}{4}\sqrt{\frac{g}{h}}<v<\frac{1}{2}\sqrt{\frac{(4L_1^2+L_2^2)g}{6h}}$

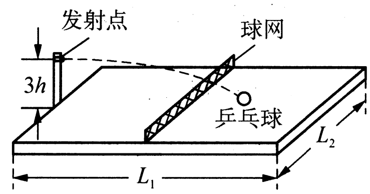


图1-5-1

思路点拨

本题通过平抛运动的运动特征来考查运动的合成和分解。处理平抛运动的常用办法是将物体的运动分解成水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动。此题中求发射速率的范围关键是确定最小和最大的两个临界值，其实就是确认水平位移的最小和最大值。当发射速率比较小时有可能导致球下网，所以当球恰好擦网而过的时候速率最小，但又考虑到发射的方向是可任意调节的，所以沿中轴线方向发射刚好擦网而过时发射速率最小，即水平位移最小为 $\frac{L_1}{2}$。当球落到右侧台面的边缘时发射速率最大，再考虑发射方向时，落到右侧台面两个角时的发射速率最大，即水平位移最大为 $\sqrt{\left(\frac{L_2}{2}\right)^2+L_1^2}$。

分析解答

发射机无论从哪个方向发射，乒乓球射出后做平抛运动，竖直高度决定了运动时间 t，水平方向做匀速直线运动，水平位移最小的是沿中线方向水平发射，刚好擦网而过时的速度为 v_1，从发球点到球网，有 $3h-h=\frac{1}{2}gt_1^2$，$\frac{L_1}{2}=v_1t_1$ 得 $v_1=\frac{L_1}{4}\sqrt{\frac{g}{h}}$，要落到球网右侧，发射速度 $v>\frac{L_1}{4}\sqrt{\frac{g}{h}}$，故可判定A、C错；水平位移最大是斜向对方台面的两个角发射，设刚好出台角的发射速度为 v_2，有 $3h=\frac{1}{2}gt_2^2$，$\sqrt{\left(\frac{L_2}{2}\right)^2+L_1^2}=v_2t_2$，得 $v_2=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{(L_2^2+4L_1^2)g}{6h}}$，要落到球网右侧台面上发射速度 $\frac{L_1}{4}\sqrt{\frac{g}{h}}<v<\frac{1}{2}\sqrt{\frac{(L_2^2+4L_1^2)g}{6h}}$，故选项D正确。

考点伸展

5.（2015 年浙江理综卷第 17 题）如图 1-5-2 所示为足球球门，球门宽为 L，一个球员在球门中心正前方距离球门 s 处高高跃起，将足球顶入球门的左下方死角（图中 P 点）。球员顶球点的高度为 h。足球做平抛运动（足球可看做质点，忽略空气阻力），则（　　）。

A．足球位移大小 $x=\sqrt{\frac{L^2}{4}+s^2}$

B．足球初速度的大小 $v_0=\sqrt{\frac{g}{2h}\left(\frac{L^2}{4}+s^2\right)}$

C．足球末速度的大小 $v=\sqrt{\frac{g}{2h}\left(\frac{L^2}{4}+s^2\right)+4gh}$

D．足球初速度的方向与球门线夹角的正切值 $\tan\theta=\frac{L}{2s}$

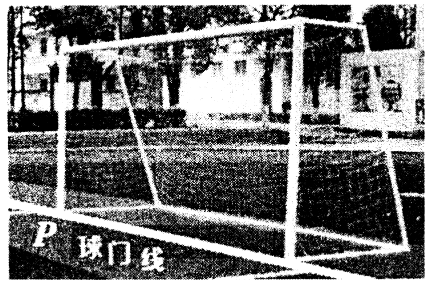


图 1-5-2

6. 2014 年全国新课标Ⅰ卷第 20 题

如图 1-6-1 所示，两个质量均为 m 的小木块 a 和 b（可视为质点）放在水平圆盘上，a 与转轴 OO' 的距离为 l，b 与转轴的距离为 $2l$。木块与圆盘的最大静摩擦力为木块所受重力的 k 倍，重力加速度大小为 g。若圆盘从静止开始绕转轴缓慢地加速转动，用 ω 表示圆盘转动的角速度，下列说法中正确的是（　　）。

A. b 一定比 a 先开始滑动

B. a、b 所受的摩擦力始终相等

C. $\omega=\sqrt{\frac{kg}{2l}}$ 是 b 开始滑动的临界角速度

D. 当 $\omega=\sqrt{\frac{2kg}{3l}}$ 时，a 所受摩擦力的大小为 kmg

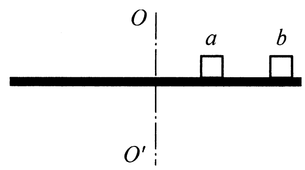


图 1-6-1

思路点拨

本题考查匀速圆周运动、相对滑动问题，难点是判断当静摩擦力提供做匀速圆周运动的向心力时发生滑动的临界值。当圆盘转动的角速度较小时静摩擦力足以提供物体做圆周运动的向心力，所以不会发生相对滑动，当转动的角速度较大时静摩擦力不足以提供向心力时就会发生相对滑动。而两物块做圆周运动时的绕行半径不同，所以刚开始滑动时的临界的角速度也不同。临界的角速度的计算根据最大静摩擦力提供向心力去计算。在未发生相对滑动前两物块的角速度相同。

分析解答

小木块都随圆盘做匀速圆周运动时，在发生相对滑动之前，角速度相等，静摩擦力提供向心力，即 $F_{静}=m\omega^2 r$，由于 $r_a=l$，$r_b=2l$，所以发生相对滑动前木块 b 的静摩擦力大，B 错误；随着角速度的增大，当静摩擦力等于最大静摩擦力时，木块将开始滑动，即 $kmg=m\omega^2 r$，$\omega=\sqrt{\frac{kg}{r}}$，代入两个木块做圆周运动的半径，小木块 a 开始滑动时的角速度 $\omega_a=\sqrt{\frac{kg}{l}}$ 大于木块 b 开始滑动时的角速度 $\omega_b=\sqrt{\frac{kg}{2l}}$，A、C 正确；又 $\omega=\sqrt{\frac{2kg}{3l}}<\sqrt{\frac{kg}{l}}$，所以木块 a 未达到临界状态，摩擦力还没有达到最大静摩擦力，所以选项 D 错误。所以 AC 正确。

考点伸展

6.（2018 年江苏物理卷）火车以 60 m/s 的速率转过一段弯道，某乘客发现放在桌面上的指南针在 10 s 内匀速转过了约 10°。在此 10 s 时间内，火车（　　）。

A. 运动路程为 600 m

B. 加速度为零

C. 角速度约为 1 rad/s

D. 转弯半径约为 3.4 km

7. 2015 年甘肃模拟卷

如图 1－7－1 所示，轮滑运动员从较高的弧形坡面滑到 A 处，沿水平方向飞离坡面，在空中划出一段抛物线后，再落到倾角为 θ 的斜坡上 B 点，若飞出时的速度大小为 v_0，则（　　）。

A．运动员落到斜坡上时，速度方向与坡面平行

B．运动员落到斜坡上 B 点时的速度大小是 $\dfrac{v_0}{\cos\theta}$

C．运动员从 A 点到 B 点经历的时间是 $\dfrac{2v_0\tan\theta}{g}$

D．运动员的落点 B 与起点 A 的距离是 $\dfrac{2v_0^2\sin\theta}{g\cos^2\theta}$

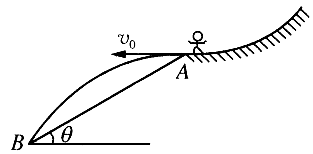


图 1－7－1

思路点拨

本题考查平抛运动、匀变速运动的规律，难点是对平抛运动进行恰当的分解。常规的平抛运动分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动，此题中将平抛运动分解为沿斜面向下的匀加速直线运动和垂直斜面向上的竖直上抛运动（如图 1－7－2 所示）。这是另外一种理解平抛运动的方式，在某些情况下这样分解可以较快地解决问题。譬如求时间，直接就是竖直上抛运动的时间 $t=2\dfrac{v_0\sin\theta}{g\cos\theta}$。再如求运动员离开斜面最远的距离，此分解方式中可以知道竖直上抛运动的最高点即离开斜面最远 $H=\dfrac{(v_0\sin\theta)^2}{2g\cos\theta}$。当然常规的平抛运动的分解方式也能求解，只不过相对此法计算要较复杂一点。

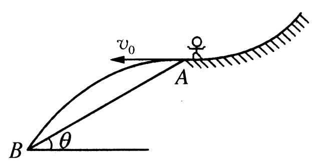


图 1－7－2

分析解答

运动员从 A 到 B 是平抛运动，此过程可以分解为沿斜面方向的匀加速直线运动和垂直斜面方向的竖直上抛运动。具体的分解情况如图 1－7－3 所示，沿斜面 x 方向是初速度为 $v_0\cos\theta$，加速度为 $g\sin\theta$ 的匀加速直线运动；沿垂直斜面向上 y 方向是初速度为 $v_0\sin\theta$，加速度为 $g\cos\theta$ 的竖直上抛运动。从 y 轴方向看全程的时间为 $t=2\dfrac{v_0\sin\theta}{g\cos\theta}$，$AB$ 的长 $x=v_0\cos\theta\cdot2\dfrac{v_0\sin\theta}{g\cos\theta}+\dfrac{1}{2}g\sin\theta\cdot\left(2\dfrac{v_0\sin\theta}{g\cos\theta}\right)^2=\dfrac{2v_0^2\sin\theta}{g\cos^2\theta}$，故选项 C、D 正确；到 B 点时 $v_x=v_0\cos\theta+g\sin\theta\cdot2\dfrac{v_0\sin\theta}{g\cos\theta}=\dfrac{v_0+v_0\sin^2\theta}{\cos\theta}$，$v_y=-v_0\sin\theta$，因此运动员在 B 点时的速度方向不会平行于斜面，速度大小为 $v_B=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=v_0\sqrt{1+4\tan^2\theta}$，故选项 A、B 错误。所以正确答案是 C、D。当然本题也可以沿水平和竖直方向正交分解，同样可以选出正确答案，但对于求解离开斜面最远距离一类问题时此方法相对更

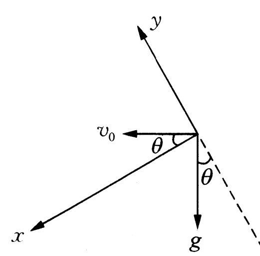


图 1－7－3

简单方便。

考点伸展

7.（2019年全国理综Ⅱ卷）如图1－7－4，在跳台滑雪比赛中，运动员在空中滑翔时身体的姿态会影响其下落的速度和滑翔的距离。某运动员先后两次从同一跳台起跳，每次都从离开跳台开始计时，用v表示他在竖直方向的速度，其$v-t$图象如图1－7－5所示，t_1和t_2是他落在倾斜雪道上的时刻。则（　　）。

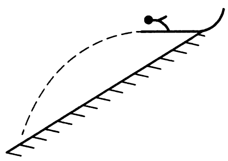


图1－7－4

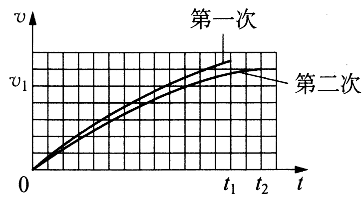


图1－7－5

A．第二次滑翔过程中在竖直方向上的位移比第一次的小

B．第二次滑翔过程中在水平方向上的位移比第一次的大

C．第二次滑翔过程中在竖直方向上的平均加速度比第一次的大

D．竖直方向速度大小为v_1时，第二次滑翔在竖直方向上所受阻力比第一次的大

8. 2019年北京理综卷第24题

雨滴落到地面的速度通常仅为几米每秒，这与雨滴下落过程中受到空气阻力有关。雨滴间无相互作用且雨滴质量不变，重力加速度为 g。

(1) 质量为 m 的雨滴由静止开始，下落高度 h 时速度为 u，求这一过程中克服空气阻力所做的功 W。

(2) 将雨滴看作半径为 r 的球体，设其竖直落向地面的过程中所受空气阻力 $f=kr^2v^2$，其中 v 是雨滴的速度，k 是比例系数。

a. 设雨滴的密度为 ρ，推导雨滴下落趋近的最大速度 v_m 与半径 r 的关系式；

b. 图1-8-1中画出了半径为 r_1、r_2($r_1>r_2$)的雨滴在空气中无初速下落的 $v-t$ 图线，其中________对应半径为 r_1 的雨滴(选填①或②)；若不计空气阻力，请在图中画出雨滴无初速下落的 $v-t$ 图线。

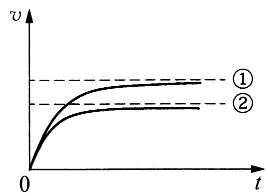


图1-8-1

(3) 由于大量气体分子在各方向运动的几率相等，其对静止雨滴的作用合力为零。将雨滴简化为垂直于运动方向面积为 S 的圆盘，证明：圆盘以速度 v 下落时受到的空气阻力 $f\propto v^2$（提示：设单位体积内空气分子数为 n，空气分子质量为 m_0）。

思路点拨

(1) 雨滴下落过程中所受空气阻力是变力，应用动能定理求解。

(2) 雨滴受重力和空气阻力的作用，且阻力随速度的增加而增大，故雨滴下落过程中做加速度减小、速度增大的变加速直线运动，当加速度为0时，速度最大。

(3) 因大量气体分子在各方向运动的几率相等，其对静止雨滴的作用合力为零。故将雨滴简化为垂直于运动方向面积为 S 的圆盘以速度 v 下落时，可只考虑空气分子相对于圆盘以速度 v 运动对圆盘产生的阻力。取极短的时间 Δt 内与圆盘碰撞的空气分子为研究对象，应用动量定理结合牛顿第三定律证明即可。

满分解答

解：(1) 根据动能定理，有

$$mgh-W=\frac{1}{2}mu^2$$

可得克服阻力做的功 $W=mgh-\frac{1}{2}mu^2$。

(2) a. 根据牛顿第二定律，有

$$mg-f=ma$$

得
$$a=g-\frac{kr^2v^2}{m}$$

当加速度为零时，雨滴达到最大速度 v_m，雨滴质量 $m=\rho\cdot\frac{4}{3}\pi r^3$，由 $a=0$ 可得，雨滴最大速度 $v_m=\sqrt{\frac{4\pi\rho g}{3k}r}$。

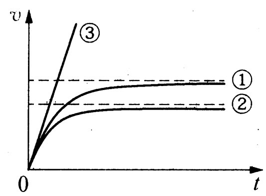


图 1-8-2

b. 由 $v_m=\sqrt{\frac{4\pi\rho g}{3k}r}$ 可知，雨滴半径越大，最大速度越大，所以 ① 对应半径为 r_1 的雨滴。不计空气阻力，雨滴做自由落体运动，$v-t$ 图线如图 1-8-2 中 ③ 所示。

(3) 根据题设条件，大量气体分子在各个方向运动的几率相等，其对静止雨滴的作用合力为零。以下只考雨滴下落的定向运动。

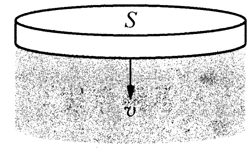


图 1-8-3

简化圆盘模型如图 1-8-3 所示。设空气分子与圆盘碰撞前后相对速度大小不变。在极短时间 Δt 内，与圆盘碰撞的空气分子个数为 $N=nSv\Delta t$，质量为 $\Delta m=Nm_0$。

以 F 表示圆盘对空气分子的作用力，根据动量定理，有

$$F\Delta t\propto\Delta m\cdot v$$

得

$$F\propto nm_0Sv^2$$

由牛顿第三定律，可知圆盘所受阻力

$$f\propto v^2$$

采用不同的碰撞模型，也可得到相同的结论。

考点伸展

8. 密度为 ρ、半径为 r 的球状雨滴 a 在下落速度已达到最大时，与在同一直线上等质量、瞬时速度为 0 的另一雨滴 b 相遇，在极短时间内变为一颗大雨滴。大雨滴继续下落高度为 H 时匀速运动，求此过程中大雨滴克服阻力所做的功 W。

9. 2015年海南物理卷第14题

如图1-9-1所示，位于竖直平面内的光滑轨道由四分之一圆弧 ab 和抛物线 bc 组成，圆弧半径 Oa 水平，b 点为抛物线顶点。已知 $h=2\text{ m}$，$s=\sqrt{2}\text{ m}$。取重力加速度大小为 $g=10\text{ m/s}^2$。

(1) 一小环套在轨道上从 a 点由静止滑下，当其在 bc 段轨道运动时，与轨道之间无相互作用力，求圆弧轨道的半径；

(2) 若小环从 b 点由静止因微小扰动开始滑下，求环达到 c 点时速度的水平分量的大小。

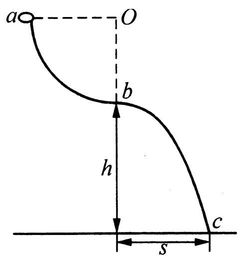


图1-9-1

思路点拨

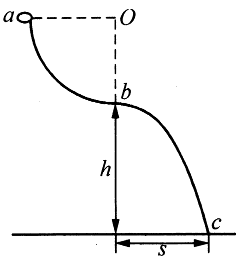


图1-9-2

本题是力学综合题，主要考查平抛运动和机械能守恒定律。对于机械能守恒定律，要抓住机械能守恒的条件，一小环套在轨道上运动时，由于只有重力做功，所以机械能守恒。小环运动到 b 点后，若无轨道 bc，本应做平抛运动，现因轨道所限只能沿轨道 bc 运动，因 bc 为抛物线轨道，故只有当轨道 bc 与小环从 b 点做平抛运动的抛物线恰好重合时，小环与轨道 bc 之间才始终没有作用力。

满分解答

解：(1) 小圆环在 bc 段上运动时，与轨道之间无作用力。则说明小环到 b 点时的速度，使小环做平抛运动的轨迹与 bc 重合。故有

$$s=v_0t \quad ①$$

$$h=\frac{1}{2}gt^2 \quad ②$$

小环在 ab 段运动过程中，由机械能守恒，有

$$mgR=\frac{1}{2}mv_0^2 \quad ③$$

联立①②③式，得 $R=\dfrac{s^2}{4h}=0.25\text{ m}$。④

(2) 小环从 b 点由静止因微小扰动开始滑下，只有重力做功，机械能守恒，有

$$mgh=\frac{1}{2}mv_c^2 \quad ⑤$$

设小环到 c 点速度 v_c 与水平方向夹角为 θ，则 c 点的速度的水平分量的大小为 v_{cx}。

由第(1)题中可求出 $\cos\theta=\dfrac{v_x}{v}=\dfrac{\sqrt{2gR}}{\sqrt{2g(R+h)}}=\sqrt{\dfrac{R}{R+h}}$；

则 $v_{cx}=v_c\cos\theta=\sqrt{2gh}\sqrt{\dfrac{R}{R+h}}=2.11\text{ m/s}$。

考点伸展

9. 原题中，一小环套在轨道上先后两次从 a 点滑下，经过 b 点然后到达 c 点。第 1 次由静止滑下。第 2 次以一定的竖直向下的初速度滑下。如果第 2 次小环到 c 点的水平分速是第 1 次的 n 倍，求小环第 2 次运动到 b 点前一瞬间对轨道的压力与第 1 次之比。

专题二　多过程的运动问题

1. 2019 年全国理综Ⅲ卷第 20 题

如图 2-1-1，物块和木板叠放在实验台上，物块用一不可伸长的细绳与固定在实验台上的力传感器相连，细绳水平。$t=0$ 时，木板开始受到水平外力 F 的作用，在 $t=4\ s$ 时撤去外力。细绳对物块的拉力 f 随时间 t 变化的关系如图 2-1-2 所示，木板的速度 v 与时间 t 的关系如图 2-1-3 所示。木板与实验台之间的摩擦可以忽略。重力加速度取 $g=10\ m/s^2$。由题给数据可以得出（　　）。

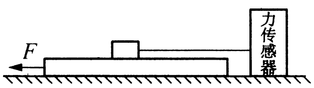


图 2-1-1

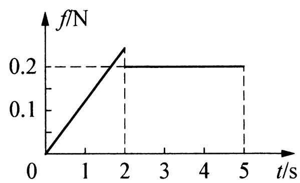


图 2-1-2

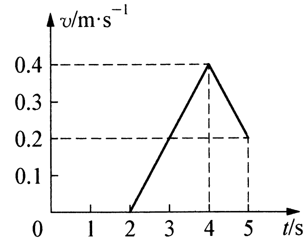


图 2-1-3

A．木板的质量为 1 kg

B．2 s～4 s 内，力 F 的大小为 0.4 N

C．0～2 s 内，力 F 的大小保持不变

D．物块与木板之间的动摩擦因数为 0.2

思路点拨

本题考查牛顿运动定律、匀变速直线运动及其公式和图象，重点关注结合图象由运动判断力。根据 $v-t$ 图象可知物体运动时的加速度，再根据物体运动的情景列出加速、减速时的牛顿第二定律方程，从而解出所需结果。牛顿第二定律应用过程中会涉及动力学的两类问题，一类是已知运动求力，另一类是已知力求运动。无论哪一种关键是列出牛顿第二定律的方程。

分析解答

结合两图象可判断出 0～2 s 物块和木板还未发生相对滑动，物体处于静止状态，它们之间的摩擦力为静摩擦力，此过程力 F 与静摩擦力 f 平衡，故 F 在此过程中是变力，即 C 错误；2～5 s 内木板与物块发生相对滑动，摩擦力转变为滑动摩擦力，由牛顿运动定律，对 2～4 s 和 4～5 s 列运动学方程，可解出质量 m 为 1 kg，2～4 s 内的力 F 为 0.4 N，故 A、B 正确；由于不知道物块的质量，所以无法计算它们之间的动摩擦因数 μ，故 D 错误。

考点伸展

1.（2018 年理综全国卷Ⅲ）地下矿井中的矿石装在矿车中，用电机通过竖井运送至地面。某竖井中矿车提升的速度大小 v 随时间 t 的变化关系如图 2－1－4 所示，其中图线①②分别描述两次不同的提升过程，它们变速阶段加速度的大小都相同；两次提升的高度相同，提升的质量相等。不考虑摩擦阻力和空气阻力。对于第①次和第②次提升过程（　　）。

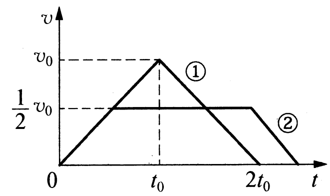


图 2－1－4

A. 矿车上升所用的时间之比为 4∶5

B. 电机的最大牵引力之比为 2∶1

C. 电机输出的最大功率之比为 2∶1

D. 电机所做的功之比为 4∶5

2. 2014 年江苏物理卷第 8 题

如图 2-2-1 所示，A、B 两物块的质量分别为 $2m$ 和 m，静止叠放在水平地面上。A、B 间的动摩擦因数为 μ，B 与地面间的动摩擦因数为 $\mu/2$。最大静摩擦力等于滑动摩擦力，重力加速度为 g。现对 A 施加一水平拉力 F，则（　　）。

A. 当 $F<2\mu mg$ 时，A、B 都相对地面静止

B. 当 $F=\frac{5}{2}\mu mg$ 时，A 的加速度为 $\frac{1}{3}\mu g$

C. 当 $F>3\mu mg$ 时，A 相对 B 滑动

D. 无论 F 为何值，B 的加速度不会超过 $\frac{1}{2}\mu g$

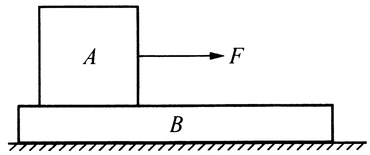


图 2-2-1

思路点拨

本题考查牛顿第二定律的应用、连接体问题，重点关注两物体相对滑动的情况。对于两个物体一起运动时，会不会分离关键看两者加速度是否一样，如果加速度能做到一样那么两个物体是不会分离的，反之则会分离。本题中，对 B 物块而言所受地面的摩擦力最大是滑动摩擦力 $F_{f2}=\frac{1}{2}3\mu mg$；对 A 物块而言最大的摩擦力为 $F_{f1}=2\mu mg$。对于 B 而言会产生加速度是因为 A 对 B 的摩擦力和地面给 B 的摩擦力的合力产生的，所以 B 的最大加速度 $a=\frac{F_{f1}-F_{f2}}{m}=\frac{\mu g}{2}$。因此当 F 让整体的加速度大于$\frac{\mu g}{2}$时，A、B 就会分离。

分析解答

由题意可知 A、B 间的最大静摩擦力 $F_{f1}=2\mu mg$，B 与地面间的最大静摩擦力 $F_{f2}=\frac{1}{2}3\mu mg$，所以当 F 逐渐增大至$\frac{3\mu mg}{2}$时，B 与地面间先发生相对滑动，A 项错误；F 继续增大，A、B 间摩擦力也逐渐增大，当 A、B 间摩擦力增大至 $2\mu mg$ 时，A、B 恰要发生相对滑动，此时对 B 由牛顿第二定律列式得 $F_{f1}-F_{f2}=ma$，可以解得 $a=\frac{\mu g}{2}$；对 A 由牛顿第二定律列式得 $F-F_{f1}=2ma$，解得 $F=3\mu mg$，C项正确；F继续增大，B受到两个不变的滑动摩擦力，加速度始终为$\frac{\mu g}{2}$，D 项正确；当 $F=\frac{5}{2}\mu mg$，A、B 间会发生相对滑动。由牛顿第二定律有：$a=\frac{F-f_{max}}{m_A}=\frac{\frac{5}{2}\mu mg-2\mu mg}{2m}=\frac{1}{4}\mu g$，B 错误。所以正确答案是 CD。

考点伸展

2.（2016 年江苏物理卷第 9 题）如图 2-2-2 所示，一只猫在桌边猛地将桌布从鱼缸下拉出，鱼缸最终没有滑出桌面。若鱼缸、桌布、桌面两两之间的动摩擦因数均相等，则在上述过程中（　　）。

A．桌布对鱼缸摩擦力的方向向左

B．鱼缸在桌布上的滑动时间和在桌面上的相等

C．若猫增大拉力，鱼缸受到的摩擦力将增大

D．若猫减小拉力，鱼缸有可能滑出桌面

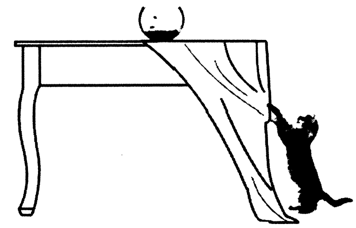


图 2－2－2

3. 2017 年海南物理卷第 14 题

一轻弹簧的一端固定在倾角为 θ 的固定光滑斜面的底部，另一端和质量为 m 的小物块 a 相连，如图 2-3-1 所示。质量为 $\frac{3}{5}m$ 的小物块 b 紧靠 a 静止在斜面上，此时弹簧的压缩量为 x_0，从 $t=0$ 时开始，对 b 施加沿斜面向上的外力，使 b 始终做匀加速直线运动。经过一段时间后，物块 a、b 分离；再经过同样长的时间，b 距其出发点的距离恰好也为 x_0。弹簧的形变始终在弹性限度内，重力加速度大小为 g。求

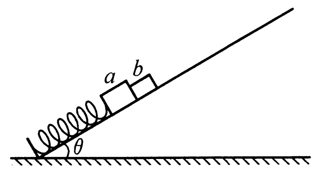


图 2-3-1

(1) 弹簧的劲度系数；

(2) 物块 b 加速度的大小；

(3) 在物块 a、b 分离前，外力大小随时间变化的关系式。

思路点拨

本题考查了胡克定律、牛顿第二定律等知识点，在近几年的各省高考题中出现的频率较高，常与共点力的平衡条件及其应用等知识点交汇命题。本题解答的关键是要搞清楚 a、b 两物体分离的临界条件。a、b 两物体分离的条件是两物体间的正压力为 0，此时两物块有相同的速度及加速度，此时两物体开始分离。

(1) 开始系统静止，弹簧的压缩量已知，根据平衡条件列方程解得弹簧的劲度系数。

(2) 根据分离前后分别对物块 a 与 b 应用牛顿第二定律，再根据运动学公式联立解答。

(3) 对整体在物块 a、b 分离前，列出牛顿第二定律方程，找到压缩量与时间 t 的函数关系，最后得出 F 的表达式。

满分解答

解：(1) 刚开始时弹簧压缩量为 x_0，选择 a、b 组成的系统为研究对象，根据平衡条件和胡克定律得

$$\left(m+\frac{3}{5}m\right)g\sin\theta = kx_0 \quad ①$$

解得

$$k=\frac{8mg\sin\theta}{5x_0} \quad ②$$

(2) a、b 两物体分离的条件是两物体间的正压力为 0，设经过时间 t 物块 a、b 分离，此时弹簧的压缩量为 x_1，则分离时，对小物块 a 有

$$kx_1 - mg\sin\theta = ma \quad ③$$

根据运动学公式可知，分离前 a、b 运动的距离为有

$$x_0 - x_1 = \frac{1}{2}at^2 \quad ④$$

b 始终做匀加速直线运动，则有

$$x_0 = \frac{1}{2}a \times (2t)^2 \quad ⑤$$

联立解得

$$x_1 = \frac{3}{4}x_0 \quad ⑥$$

$$a = \frac{1}{5}g\sin\theta \quad ⑦$$

(3) 在物块 a、b 分离前，对 ab 整体根据牛顿第二定律有

$$F + kx - \left(m + \frac{3}{5}m\right)g\sin\theta = \left(m + \frac{3}{5}m\right)a \quad ⑧$$

解得

$$F = \frac{8}{5}ma + \frac{8}{5}mg\sin\theta - kx \quad ⑨$$

由题意可知

$$x = x_0 - \frac{1}{2}at^2 \quad ⑩$$

代入整理得

$$F = \frac{8}{25}mg\sin\theta + \frac{4mg^2\sin^2\theta}{25x_0}t^2 \quad ⑪$$

在物块 a、b 分离前，需满足

$$0 \leqslant t < \sqrt{\frac{5x_0}{2g\sin\theta}} \quad ⑫$$

则在物块 a、b 分离前，外力大小随时间变化的关系式为：$F = \frac{8}{25}mg\sin\theta + \frac{4mg^2\sin^2\theta}{25x_0}t^2$，其中 $0 \leqslant t < \sqrt{\frac{5x_0}{2g\sin\theta}}$。

考点伸展

3. 在物块 a、b 分离前，a、b 间弹力大小随时间变化的关系式。

4. 2016 年全国理综卷Ⅰ第 25 题

如图 2-4-1 所示，一轻弹簧原长为 $2R$，其一端固定在倾角为 $37°$ 的固定直轨道 AC 的底端 A 处，另一端位于直轨道上 B 处，弹簧处于自然状态，直轨道与一半径为 $\frac{5}{6}R$ 的光滑圆弧轨道相切于 C 点，$AC = 7R$，A、B、C、D 均在同一竖直面内。质量为 m 的小物块 P 自 C 点由静止开始下滑，最低到达 E 点（未画出），随后 P 沿轨道被弹回，最高点到达 F 点，$AF = 4R$，已知 P 与直轨道间的动摩擦因数 $\mu = \frac{1}{4}$，重力加速度大小为 g。（取 $\sin 37° = 0.6$，$\cos 37° = 0.8$）

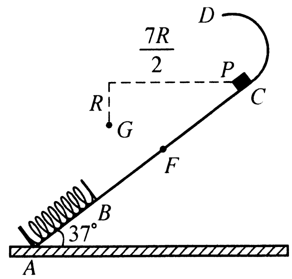


图 2-4-1

（1）求 P 第一次运动到 B 点时速度的大小；

（2）求 P 运动到 E 点时弹簧的弹性势能；

（3）改变物块 P 的质量，将 P 推至 E 点，从静止开始释放。已知 P 自圆弧轨道的最高点 D 处水平飞出后，恰好通过 G 点。G 点在 C 点左下方，与 C 点水平相距 $\frac{7}{2}R$、竖直相距 R，求 P 运动到 D 点时速度的大小和改变后 P 的质量。

思路点拨

（1）因物块 P 由 C 运动至 B 是匀加速度直线运动过程，故既可以先根据牛顿第二定律求加速度，再求速度；也可以用动能定理直接求速度。

（2）弹簧弹性势能的变化由弹簧弹力所做的功来度量。P 由 B 点运动到 E 点的过程中，设 P 到达 E 点时弹簧的弹性势能为 E_p，则有 $W_{F_弹} = -\Delta E_p = -E_p$。故为求弹簧弹性势能 E_p，只要用动能定理求弹力做功即可。

（3）先由题意用平抛运动规律求改变质量后 P 在 D 点的速度；再取 P 从 E 点到 C 点、C 点到 D 点的过程，运用机械能守恒定律及动能定理确定改变后 P 的质量（也可以直接取 P 从 E 点运动到 D 点为过程，运用动能定理确定）。

满分解答

解：（1）根据题意知，B、C 之间的距离 l 为

$$l = 7R - 2R = 5R \qquad ①$$

设 P 到达 B 点时的速度为 v_B，由动能定理得

$$mgl\sin\theta - \mu mgl\cos\theta = \frac{1}{2}mv_B^2 \qquad ②$$

式中 $\theta = 37°$，联立①②式并由题给条件得

$$v_B = 2\sqrt{gR} \qquad ③$$

（2）设 $BE = x$。P 到达 E 点时速度为零，设此时弹簧的弹性势能为 E_p，P 由 B 点运动到 E

点的过程中，由动能定理有

$$mgx\sin\theta-\mu mgx\cos\theta-E_p=0-\frac{1}{2}mv_B^2 \quad ④$$

E、F之间的距离l_1为

$$l_1=4R-2R+x=2R+x \quad ⑤$$

P到达E点后反弹，从E点运动到F点的过程中，由动能定理有

$$E_P-mgl_1\sin\theta-\mu mgl_1\cos\theta=0 \quad ⑥$$

联立③④⑤⑥式并由题给条件得

$$x=R \quad ⑦$$

$$E_P=\frac{12}{5}mgR \quad ⑧$$

(3) 设改变后P的质量为m_1，D点与G点的水平及竖直距离分别为x_1和y_1。由题意，过C点的圆轨道半径与竖直方向的夹角也为θ，则

$$x_1=\frac{7}{2}R-\frac{5}{6}R\sin\theta=3R \quad ⑨$$

$$y_1=R+\frac{5}{6}R(1+\cos\theta)=\frac{5}{2}R \quad ⑩$$

设P在D点的速度为v_D，由D点运动到G点的时间为t。由平抛运动公式有

$$y_1=\frac{1}{2}gt^2 \quad ⑪$$

$$x_1=v_Dt \quad ⑫$$

联立⑨⑩⑪⑫式得

$$v_D=\frac{3}{5}\sqrt{5gR} \quad ⑬$$

设P在C点速度的大小为v_C。在P由C运动到D的过程中机械能守恒，有

$$\frac{1}{2}m_1v_C^2=\frac{1}{2}m_1v_D^2+m_1g\cdot\frac{5}{6}R(1+\cos\theta) \quad ⑭$$

P由E点运动到C点的过程中，由动能定理有

$$E_p-m_1g(x+5R)\sin\theta-\mu m_1g(x+5R)\cos\theta=\frac{1}{2}m_1v_C^2 \quad ⑮$$

联立⑦⑧⑬⑭⑮式得

$$m_1=\frac{1}{3}m \quad ⑯$$

考点伸展

4. 原题中，若 P 的质量为 $m_1 = \frac{1}{3}m$，换用原长也为 $2R$、劲度系数不同的轻弹簧，将 P 推至 E 点，从静止开始释放。P 沿轨道运动恰好能够到达 D 点，求新弹簧的劲度系数是原来的几倍。已知弹簧的弹性势能 $E_P = \frac{1}{2}kx^2$，式中 k 为弹簧的劲度系数，x 为弹簧的形变量。

5. 2018 年全国理综Ⅲ卷第 12 题

如图 2-5-1 所示，在竖直平面内，一半径为 R 的光滑圆弧轨道 ABC 和水平轨道 PA 在 A 点相切。BC 为圆弧轨道的直径。O 为圆心，OA 和 OB 之间的夹角为 α，$\sin\alpha=0.6$，一质量为 m 的小球沿水平轨道向右运动，经 A 点沿圆弧轨道通过 C 点，落至水平轨道；在整个过程中，除受到重力及轨道作用力外，小球还一直受到一水平恒力的作用，已知小球在 C 点所受合力的方向指向圆心，且此时小球对轨道的压力恰好为零。重力加速度大小为 g。求：

(1) 水平恒力的大小和小球到达 C 点时速度的大小；

(2) 小球到达 A 点时动量的大小；

(3) 小球从 C 点落至水平轨道所用的时间。

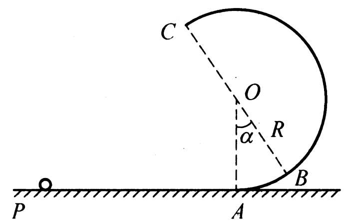


图 2-5-1

思路点拨

本题考查小球在竖直面内的圆周运动、受力分析、动量、类平抛运动及相关的知识点，意在考查考生灵活运用相关知识解决问题的能力。解答本题的关键是要考虑到小球运动过程中始终受到一个水平恒力的作用，切勿思维定势而忘记了水平恒力的存在。难点是求小球从 C 点抛出后做类平抛运动到达水平轨道上所用的时间，由于沿抛出速度方向的匀速运动与沿合力方向的匀加速运动的位移都不确定，考虑到运动的独立性，竖直方向只受重力作用，下落高度确定，将抛出速度沿竖直、水平两个方向分解，则竖直方向做有初速度的匀加速直线运动，可求得结果。

满分解答

解：(1) 在 C 点对小球进行受力分析，小球受到重力 G 和水平恒力 F_0，合力 F 恰好沿半径 CO 方向，如图 2-5-2 所示，根据力的合成法则有

$$F_0=mg\tan\alpha=\frac{3}{4}mg;$$

$$F=\frac{mg}{\cos\alpha}=\frac{5}{4}mg。$$

设小球到达 C 点时的速度大小为 v_c，由牛顿第二定律得

$$F=m\frac{v_c^2}{R};$$

$$v_c=\frac{\sqrt{5gR}}{2}。$$

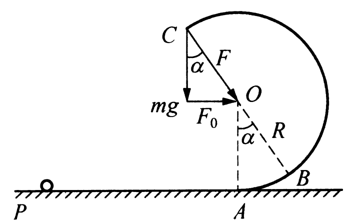


图 2-5-2

(2) 设小球到达 A 点的速度大小为 v_A，对小球从 A 点沿圆弧轨道到达 C 点的过程应用动能定理可得

$$-mg(R+R\cos\alpha)-F_0R\sin\alpha=\frac{1}{2}mv_C^2-\frac{1}{2}mv_A^2;$$

解得

$$v_A=\frac{\sqrt{23gR}}{2};$$

$$p_A=mv_A=\frac{m\sqrt{23gR}}{2}。$$

(3) 小球离开 C 点后在竖直方向上做初速度不为零的匀加速运动，加速度大小为 g。设小球在竖直方向的初速度为 $v_\perp$，从 C 点落至水平轨道上所用时间为 t。由运动学公式有

$$R+R\cos\alpha=v_\perp t+\frac{1}{2}gt^2;$$

$$v_\perp=v_C\sin\alpha;$$

解得 $t=3\sqrt{\frac{R}{5g}}$。

考点伸展

5. (1) 小球到达最高点 D 时对轨道的压力；

(2) 小球从 C 点落至水平轨道的位置离 A 点的距离 L。

6. 2019 年全国理综Ⅱ卷第 25 题

一质量为 $m = 2000\text{ kg}$ 的汽车以某一速度在平直公路上匀速行驶。行驶过程中，司机忽然发现前方 100 m 处有一警示牌，立即刹车。刹车过程中，汽车所受阻力大小随时间变化可简化为图 2－6－1 中的图线。图 2－6－1 中，$0 \sim t_1$ 时间段为从司机发现警示牌到采取措施的反应时间（这段时间内汽车所受阻力已忽略，汽车仍保持匀速行驶），$t_1 = 0.8\text{ s}$；$t_1 \sim t_2$ 时间段为刹车系统的启动时间，$t_2 = 1.3\text{ s}$；从 t_2 时刻开始汽车的刹车系统稳定工作，直至汽车停止。已知从 t_2 时刻开始，汽车第 1 s 内的位移为 24 m，第 4 s 内的位移为 1 m。

（1）在图 2－6－2 中定性画出从司机发现警示牌到刹车系统稳定工作后汽车运动的 $v-t$ 图线；

（2）求 t_2 时刻汽车的速度大小及此后的加速度大小；

（3）求刹车前汽车匀速行驶时的速度大小及 $t_1 \sim t_2$ 时间段内汽车克服阻力做的功；

（4）司机发现警示牌到汽车停止，汽车行驶的距离约为多少？（以 $t_1 \sim t_2$ 时间段始末速度的算术平均值替代这段时间内汽车的平均速度）

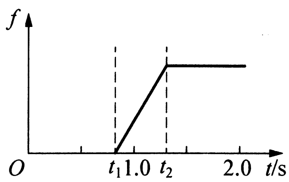


图 2－6－1

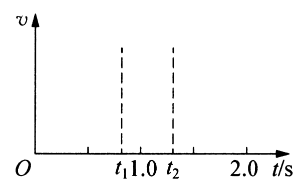


图 2－6－2

思路点拨

本题主要考查力与运动的关系，已知汽车的受力情况分析汽车的运动情况，描绘出 $v-t$ 图象，并能在匀减速运动过程中根据已知的运动学量求解加速度、速度、位移等物理量；应用动能定理，已知运动情况求解合外力做功；应用动量定理，已知合外力的冲量求解动量的变化进而得出某时刻的速度。解答本题的关键是 t_2 时刻速度的计算，汽车从 t_2 时刻开始做匀减速运动，在哪个时刻停止运动根据题中信息不能立即判断得出，必须通过列式求解、分析判断，这是本题解答的关键所在。难点是联立方程组求解计算，并由计算结果进行分析，排除错误答案。

满分解答

解：（1）在 $0 \sim t_1$ 阶段，汽车不受阻力，做匀速直线运动；在 $t_1 \sim t_2$ 阶段，阻力随时间线性增加，汽车做加速度增大的减速运动；t_2 时刻以后阻力不变，汽车做匀减速运动，$v-t$ 图象如图 2－6－3 所示。

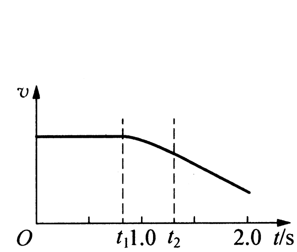


图 2－6－3

（2）设刹车前汽车匀速行驶时的速度大小为 v_1，则 t_1 时刻的速度也为 v_1。t_2 时刻的速度设为 v_2，在 t_2 时刻后汽车做匀减速运动，设其加速度大小为 a。取 $\Delta t = 1\text{ s}$，设汽车在 $t_2 + (n-1)\Delta t \sim t_2 + n\Delta t$ 内的位移为 s_n，$n = 1, 2, 3, \cdots$。若汽车在 $t_2 + 3\Delta t \sim t_2 + 4\Delta t$ 时间

内未停止，设它在 $t_2+3\Delta t$ 时刻的速度为 v_3，在 $t_2+4\Delta t$ 时刻的速度为 v_4，根据匀变速直线运动的规律有

$$s_1-s_4=3a(\Delta t)^2 \qquad ①$$

解得 $a=\frac{23}{3}\ \mathrm{m/s^2}$。

$$s_1=v_2\Delta t-\frac{1}{2}a(\Delta t)^2 \qquad ②$$

解得 $v_2=\frac{167}{6}\ \mathrm{m/s}$。

$$v_4=v_2-4a\Delta t \qquad ③$$

解得 $v_4=-\frac{17}{6}\ \mathrm{m/s}$。

这说明在 $t_2+4\Delta t$ 时刻前，汽车已经停止。因此，①式不成立。

由于在 $t_2+3\Delta t\sim t_2+4\Delta t$ 内汽车停止，由运动学公式

$$v_3=v_2-3a\Delta t \qquad ⑤$$

$$2as_4=v_3^2 \qquad ⑥$$

联立②⑤⑥式，代入已知数据解得

$$a=8\ \mathrm{m/s^2},\ v_2=28\ \mathrm{m/s}$$

或者 $a=\frac{288}{25}\ \mathrm{m/s^2}$，$v_2=29.76\ \mathrm{m/s}$。（$v_3$ 小于零，不符合条件，故舍去）。

(3) 设汽车的刹车系统稳定工作时，汽车所受阻力的大小为 f_1，由牛顿定律有

$$f_1=ma \qquad ⑦$$

在 $t_1\sim t_2$ 时间段内，阻力对汽车冲量的大小为

$$I=\frac{1}{2}f_1(t_2-t_1) \qquad ⑧$$

由动量定理得

$$-\frac{1}{2}f_1(t_2-t_1)=mv_2-mv_1 \qquad ⑨$$

联立⑦⑧⑨式，代入已知数据解得

$$v_1=30\ \mathrm{m/s}$$

由动能定理，在 $t_1\sim t_2$ 时间内，汽车克服阻力做的功为

$$W=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_2^2 \qquad ⑩$$

解得 $W=1.16\times10^5\ \mathrm{J}$。

(4) 从司机发现警示牌到汽车停止，汽车行驶的距离 s 约为

$$s = v_1 t_1 + \frac{1}{2}(v_1 + v_2)(t_2 - t_1) + \frac{v_2^2}{2a} \qquad ⑪$$

解得 $s = 87.5\ \text{m}$。

$s = 87.5\ \text{m} < 100\ \text{m}$，汽车未碰到警示牌，符合题意。

考点伸展

6. 汽车刹车系统稳定后，汽车克服阻力做的功和平均功率的大小。

7. 2015 年全国理综Ⅱ卷第 25 题

下暴雨时，有时会发生山体滑坡或泥石流等地质灾害。某地有一倾角为 $\theta=37^\circ\left(\sin 37^\circ=\dfrac{3}{5}\right)$ 的山坡 C，上面有一质量为 m 的石板 B，其上下表面与斜坡平行；B 上有一碎石堆 A（含有大量泥土），A 和 B 均处于静止状态，如图 2-7-1 所示。假设某次暴雨中，A 浸透雨水后总质量也为 m（可视为质量不变的滑块），在极短时间内，A、B 间的动摩擦因数 μ_1 减小为 $\dfrac{3}{8}$，B、C 间的动摩擦因数 μ_2 减小为 0.5，A、B 开始运动，此时刻为计时起点；在第 2 s 末，B 的上表面突然变为光滑，μ_2 保持不变。已知 A 开始运动时，A 离 B 下边缘的距离 $l=27$ m，C 足够长，设最大静摩擦力等于滑动摩擦力。取重力加速度大小 $g=10\ \text{m/s}^2$。求：

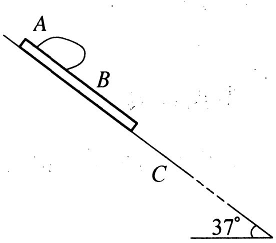


图 2-7-1

(1) 在 0～2 s 时间内 A 和 B 加速度的大小；

(2) A 在 B 上总的运动时间。

思路点拨

本题是斜面上物体运动问题的动力学综合题，第(1)小题的解答是解决第(2)的基础，解决问题所需的知识均为高中阶段力学主干知识，物理情景清晰，数学要求也不高，总体难度不大。

1. 当 A、B 间和 B、C 间的动摩擦因数均减小，A、B 开始运动后，利用隔离法分别对 A、B 进行受力分析，根据牛顿第二定律求解各自的加速度。

2. 根据题设的物理情景，分解两物体运动的不同运动过程。以开始运动到第 2 s 末、第 2 s 末到 B 物体速度减为零时刻、B 物体速度减为零时刻到 A 离开 B 时刻三个时间节点，利用受力分析、牛顿第二定律和匀变速直线运动位移和速度公式分别求解两个物体运动速度与位移，最后求解 A 在 B 上总的运动时间。

满分解答

解：(1) 在 0～2 s 时间内，A 和 B 的受力如图 2-7-2 所示，其中 f_1、N_1 是 A 与 B 之间的摩擦力和正压力的大小，f_2、N_2 是 B 与 C 之间的摩擦力和正压力的大小，方向如图 2-7-2 所示。

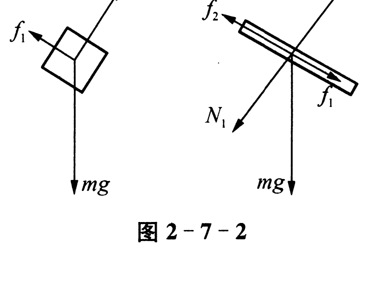


图 2-7-2

由滑动摩擦力公式和力的平衡条件：

$$f_1=\mu_1 N_1 \quad ①$$

$$N_1=mg\cos\theta \quad ②$$

$$f_2=\mu_2 N_2 \quad ③$$

$$N_2=N_1+mg\cos\theta \quad ④$$

规定沿斜面向下为正。设 A 和 B 的加速度分别为 a_1 和 a_2，由牛顿第二定律得

$$mg\sin\theta - f_1 = ma_1 \quad ⑤$$

$$mg\sin\theta - f_2 + f_1 = ma_2 \quad ⑥$$

联立①②③④⑤⑥式，并代入题给条件得

$$a_1 = 3\ \text{m/s}^2$$
$$a_2 = 1\ \text{m/s}^2$$

（2）在 $t_1 = 2$ s 时，设 A 和 B 的速度分别为 v_1 和 v_2，则

$$v_1 = a_1 t_1 = 6\ \text{m/s} \quad ⑦$$
$$v_2 = a_2 t_2 = 2\ \text{m/s} \quad ⑧$$

$t > t_1$ 时，设 A 和 B 的加速度分别为 a_1' 和 a_2'。此时 A 与 B 之间摩擦力为零，同理可得

$$a_1' = 6\ \text{m/s}^2 \quad ⑨$$
$$a_2' = -2\ \text{m/s}^2 \quad ⑩$$

即 B 做减速运动。设经过时间 t_2，B 的速度减为零，则有

$$v_2 + a_2' t_2 = 0 \quad ⑪$$

解得

$$t_2 = 1\ \text{s}$$

在 $t_1 + t_2$ 时间内，A 相对于 B 运动的距离为

$$s = \left(\frac{1}{2}a_1 t_1^2 + v_1 t_2 + \frac{1}{2}a_1' t_2^2\right) - \left(\frac{1}{2}a_2 t_1^2 + v_2 t_2 + \frac{1}{2}a_2' t_2^2\right) \quad ⑫$$
$$= 12\ \text{m} < 27\ \text{m}$$

此后 B 静止不动。A 继续在 B 上滑动。设再经过时间 t_3 后 A 离开 B，则有

$$L - s = (v_1 + a_1' t_2)t_3 + \frac{1}{2}a_1' t_3^2 \quad ⑬$$

可得 $t_3 = 1$ s（另一解不合题意，舍去）

设 A 在 B 上总的运动时间为 $t_{总}$，有

$$t_{总} = t_1 + t_2 + t_3 = 4\ \text{s} \quad ⑭$$

（也可以利用下面的速度图象求解，上方的折线是碎石堆 A 的速度图象，下方的折线是石板 B 的速度图象，阴影部分是它们在 4 s 内的相对位移 27 m，如图 2－7－3 所示）

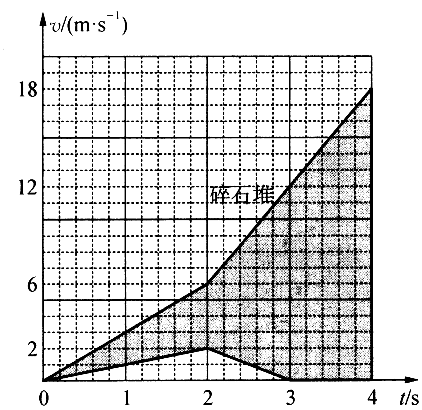


图 2－7－3

考点伸展

7. 原题中，若 $m = 100$ kg，求从 A 开始运动到离开 B 的过程中，因摩擦力做功而产生的热量。

8. 2017 年新课标理综Ⅲ卷第 25 题

如图 2-8-1 所示，两个滑块 A 和 B 的质量分别为 $m_A = 1\,\text{kg}$ 和 $m_B = 5\,\text{kg}$，放在静止于水平地面上的木板的两端，两者与木板间的动摩擦因数均为 $\mu_1 = 0.5$；木板的质量为 $m = 4\,\text{kg}$，与地面间的动摩擦因数为 $\mu_2 = 0.1$。某时刻 A、B 两滑块开始相向滑动，初速度大小均为 $v_0 = 3\,\text{m/s}$。A、B 相遇时，A 与木板恰好相对静止。设最大静摩擦力等于滑动摩擦力，取重力加速度大小 $g = 10\,\text{m/s}^2$。求

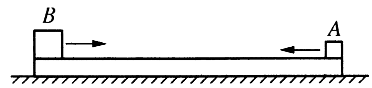


图 2-8-1

(1) B 与木板相对静止时，木板的速度；

(2) A、B 开始运动时，两者之间的距离。

思路点拨

解答本题的关键是确定滑块的受力情况，在木板上运动时何时达到共同速度，何时物块所受摩擦力发生变化，且变化后两者的加速度是否发生变化。一开始 A、B 两滑块相向运动，做加速度大小相同、方向相反的匀减速直线运动，木板由静止开始向右做加速度为 a_1 的匀加速直线运动。经 t_1 时间，滑块 B 先与木板达到共同速度 v_1。此后，滑块 B 与木板保持相对静止，它们之间滑动摩擦力转变为静摩擦力，滑块 B 与木板一起向右做加速度为 a_2 的匀减速运动，滑块 A 的受力不变，继续向左减速，减速至零后，反向加速运动，直到滑块 A、B 相遇，三者达到共同速度。

满分解答

解：(1) 滑块 A 和 B 在木板上滑动时，木板也在地面上滑动。设 A、B 和木板所受的摩擦力大小分别为 f_1、f_2、f_3，A 和 B 相对于地面的加速度大小分别是 a_A、a_B，木板相对地面的加速度大小为 a_1。在物块 B 与木板达到共同速度前有

$$f_1 = \mu_1 m_A g \quad ①$$

$$f_2 = \mu_1 m_B g \quad ②$$

$$f_3 = \mu_2 (m_A + m_B + m) g \quad ③$$

由牛顿第二定律得

$$f_1 = m_A a_A \quad ④$$

$$f_2 = m_B a_B \quad ⑤$$

$$f_2 - f_1 - f_3 = m a_1 \quad ⑥$$

设在 t_1 时刻，B 与木板达到共同速度，设大小为 v_1。由运动学公式有

$$v_1 = v_0 - a_B t_1 \quad ⑦$$

$$v_1 = a_1 t_1 \quad ⑧$$

联立①②③④⑤⑥⑦⑧式，代入已知数据得 $v_1 = 1\,\text{m/s}$。 ⑨

(2) 在 t_1 时间间隔内，B 相对于地面移动的距离为 $s_B = v_0 t_1 - \frac{1}{2} a_B t_1^2$。 ⑩

设在 B 与木板达到共同速度 v_1 后，木板的加速度大小为 a_2，对于 B 与木板组成的体系，由牛顿第二定律有 $f_1 + f_3 = (m_B + m) a_2$。 ⑪

由①②④⑤式知，$a_A = a_B$；再由⑦⑧可知，B 与木板达到共同速度时，A 的速度大小也为 v_1，但运动方向与木板相反。由题意知，A 和 B 相遇时，A 与木板的速度相同，设其大小为 v_2，设 A 的速度大小从 v_1 变到 v_2 所用时间为 t_2，则由运动学公式：对木板有

$$v_2 = v_1 - a_2 t_2 \qquad ⑫$$

对 A 有

$$v_2 = -v_1 + a_A t_2 \qquad ⑬$$

在 t_2 时间间隔内，B（以及木板）相对地面移动的距离为

$$s_1 = v_1 t_2 - \frac{1}{2} a_2 t_2^2 \qquad ⑭$$

在 $(t_1 + t_2)$ 时间间隔内，A 相对地面移动的距离为

$$s_A = v_0 (t_1 + t_2) - \frac{1}{2} a_A (t_1 + t_2)^2 \qquad ⑮$$

A 和 B 相遇时，A 与木板的速度也恰好相同。因此 A 和 B 开始运动时，两者之间的距离为

$$s_0 = s_A + s_1 + s_B \qquad ⑯$$

联立以上各式，并代入数据得

$$s_0 = 1.9\ \mathrm{m} \qquad ⑰$$

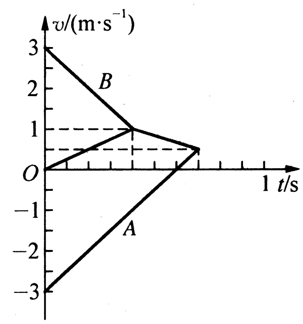


图 2－8－2

（也可用如图 2－8－2 所示的速度-时间图线求解）

考点伸展

8. 如原题所述，求从滑块 A、B 开始运动至木板停止运动的全过程中，木板的位移大小。

9. 2017 年全国理综Ⅰ卷第 25 题

真空中存在电场强度大小为 E_1 的匀强电场，一带电油滴在该电场中竖直向上做匀速直线运动，速度大小为 v_0。在油滴处于位置 A 时，将电场强度的大小突然增大到某值，但保持其方向不变。持续一段时间 t_1 后，又突然将电场反向，但保持其大小不变；再持续同样一段时间后，油滴运动到 B 点，重力加速度大小为 g。

（1）求油滴运动到 B 点时的速度；

（2）求增大后的电场强度的大小；为保证后来的电场强度比原来的大，试给出相应的 t_1 和 v_0 应满足的条件。已知不存在电场时，油滴以初速度 v_0 做竖直上抛运动的最大高度恰好等于 B、A 两点间距离的两倍。

思路点拨

本题求解有关带电粒子在匀强电场中的匀变速直线运动问题，可以从两条线索展开：其一，力和运动的关系。根据带电粒子受力情况，用牛顿第二定律求出加速度，结合运动学公式确定带电粒子的速度和位移等；其二，功和能的关系。根据电场力对带电粒子做功，引起带电粒子的能量发生变化，利用动能定理进行解答。

（1）分析油滴的运动过程，可知其先做向上的匀速直线运动，到达 A 处后因电场强度突然增大而开始做向上的匀加速直线运动，经过 t_1 后电场突然反向，油滴开始做匀减速直线运动，并可能在速度减为零后做反向的匀加速直线运动。对电场增大后的两个过程分别列出牛顿第二定律方程，即可求得两个过程中的加速度，而 t_1 又是一个已知量，那么直接使用运动学公式即可求出 v_B 的速度大小。

（2）因为油滴最后可能做反向的匀加速直线运动，因此我们不能确定 B 点的位置究竟在 A 点上方还是 A 点下方，故需要分为两种情况讨论。对其中每一种情况，根据运动学公式列出方程，并与竖直上抛的方程进行联立，即可分别求得两种情况下的场强 E_2 的大小；而根据题意，为求出 t_1 与 v_0 满足的条件，只需要使 $E_2 > E_1$ 即可，那么就可以最终求得 t_1 与 v_0 间的关系式。

满分解答

解：（1）设油滴质量和电荷量分别为 m 和 q，油滴速度方向向上为正。油滴在电场强度大小为 E_1 的匀强电场中做匀速直线运动，故油滴所受的电场力方向向上。在 $t=0$ 时，电场强度突然从 E_1 增加至 E_2 时，油滴做竖直向上的匀加速运动，加速度方向向上，其大小 a_1 满足

$$qE_2 - mg = ma_1 \quad ①$$

油滴在时刻 t_1 的速度为

$$v_1 = v_0 + a_1 t_1 \quad ②$$

电场强度在时刻 t_1 突然反向，油滴做匀变速直线运动，加速度方向向下，大小 a_2 满足

$$qE_2 + mg = ma_2 \quad ③$$

油滴在时刻 $t_2 = 2t_1$ 的速度为

$$v_2 = v_1 - a_2 t_1 \quad ④$$

由①②③④式得

$$v_2 = v_0 - 2gt_1 \quad ⑤$$

(2) 由题意,在 $t = 0$ 时刻前,受力平衡,即

$$qE_1 = mg \quad ⑥$$

油滴从 $t = 0$ 到时刻 t_1 的位移为

$$s_1 = v_0 t_1 + \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \quad ⑦$$

油滴从 t_1 时刻到 $t_2 = 2t_1$ 时刻的位移为

$$s_2 = v_1 t_1 - \frac{1}{2} a_2 t_1^2 \quad ⑧$$

设 B、A 两点间距离为 h,则根据题给条件,油滴以初速度 v_0 做竖直上抛运动应满足的条件

$$v_0^2 = 2g(2h) \quad ⑨$$

若 B 点在 A 点之上,则

$$s_1 + s_2 = h \quad ⑩$$

由⑨⑩式可得

$$E_2 = \left[2 - 2\frac{v_0}{gt_1} + \frac{1}{4}\left(\frac{v_0}{gt_1}\right)^2\right]E_1 \quad ⑪$$

因为 $E_2 > E_1$, 即

$$2 - 2\frac{v_0}{gt_1} + \frac{1}{4}\left(\frac{v_0}{gt_1}\right)^2 > 1 \quad ⑫$$

可解得

$$0 < t_1 < \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\frac{v_0}{g} \text{ 或 } t_1 > \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\frac{v_0}{g} \quad ⑬$$

若 B 在 A 点之下,依题意有

$$x_2 + x_1 = -h \quad ⑭$$

由①②③⑥⑦⑧⑨⑮式得

$$E_2 = \left[2 - 2\frac{v_0}{gt_1} - \frac{1}{4}\left(\frac{v_0}{gt_1}\right)^2\right]E_1 \quad ⑮$$

为使 $E_2 > E_1$, 应有

$$2 - 2\frac{v_0}{gt_1} - \frac{1}{4}\left(\frac{v_0}{gt_1}\right)^2 > 1 \quad ⑯$$

即

$$t_1 > \left(\frac{\sqrt{5}}{2}+1\right)\frac{v_0}{g} \quad ⑰$$

考点伸展

9. 真空中存在电场强度大小为 E_1 的匀强电场，一带电油滴在该电场中竖直向上做匀速直线运动，速度大小为 v_0。在油滴处于位置 A 时，将电场强度的大小改变为某值，但保持其方向不变。持续一段时间 t_1 后，又突然将电场反向，但保持其大小不变；再持续同样一段时间后，油滴运动返回到 A 点。重力加速度大小为 g。求改变后电场强度的大小，并讨论在改变电场之后油滴的运动情况。

10. 2017 年全国理综Ⅱ卷第 25 题

如图 2-10-1 所示，两水平面（虚线）之间的距离为 H，其间的区域存在方向水平向右的匀强电场。自该区域上方的 A 点将质量为 m、电荷量分别为 q 和 $-q(q>0)$ 的带电小球 M、N 先后以相同的初速度沿平行于电场的方向射出。小球在重力作用下进入电场区域，并从该区域的下边界离开。已知 N 离开电场时的速度方向竖直向下，M 在电场中做直线运动，刚离开电场时的动能为 N 刚离开电场时动能的 1.5 倍。不计空气阻力，重力加速度大小为 g。求

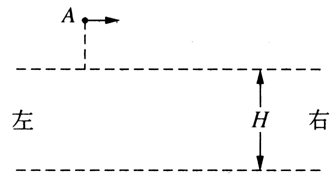


图 2-10-1

(1) M 与 N 在电场中沿水平方向的位移之比；

(2) A 点距电场上边界的高度；

(3) 该电场的电场强度大小。

思路点拨

本题考查了带电小球在复合场中的运动，理清两球在整个过程中的运动规律，将运动分解为水平方向和竖直方向的分运动，结合运动学公式灵活求解。

(1) 抓住两球在电场中，水平方向上的加速度大小相等，一个做匀加速直线运动，一个做匀减速直线运动，在竖直方向上的运动时间相等得出水平方向时间相等，结合运动学公式求出 M 与 N 在电场中沿水平方向的位移之比。

(2) 根据离开电场时动能的大小关系，抓住 M 做直线运动，得出 M 离开电场时水平分速度和竖直分速度的关系，抓住 M 速度方向不变，结合进入电场时竖直分速度和水平分速度的关系，根据速度位移公式求出 A 点距电场上边界的高度。

(3) 结合带电小球 M 电场中做直线运动，结合速度方向得出电场力和重力的关系，从而求出电场强度的大小。

满分解答

解：(1) 设带电小球 M、N 抛出的初速度均为 v_0，则它们进入电场时的水平速度仍为 v_0；M、N 在电场中的运动时间 t 相等，在电场力作用下产生的加速度沿水平方向，大小均为 a，在电场中沿水平方向的位移分别为 s_1 和 s_2；由运动公式可得：

$$v_0 - at = 0 \qquad ①$$

$$s_1 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \qquad ②$$

$$s_2 = v_0 t - \frac{1}{2}at^2 \qquad ③$$

联立①②③解得

$$s_1 : s_2 = 3 : 1 \qquad ④$$

(2) 设 A 点距离电场上边界的高度为 h，小球下落 h 时在竖直方向的分速度为 v_y，则

$$v_y^2 = 2gh \quad ⑤$$

$$H = v_y t + \frac{1}{2}gt^2 \quad ⑥$$

因为 M 在电场中做匀加速直线运动，则

$$\frac{v_0}{v_y} = \frac{s_1}{H} \quad ⑦$$

由①②⑤⑥⑦可得

$$h = \frac{1}{3}H \quad ⑧$$

(3) 设电场强度为 E，小球 M 进入电场后做直线运动，则

$$a = \frac{Eq}{m} \quad ⑨$$

$$\frac{v_0}{v_y} = \frac{qE}{mg} \quad ⑩$$

设 M、N 离开电场时的动能分别为 E_{k1}、E_{k2}，由动能定理

$$E_{k1} = \frac{1}{2}m(v_0^2 + v_y^2) + mgH + qEs_1 \quad ⑪$$

$$E_{k2} = \frac{1}{2}m(v_0^2 + v_y^2) + mgH - qEs_2 \quad ⑫$$

由已知条件

$$E_{k1} = 1.5E_{k2} \quad ⑬$$

联立④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬解得

$$E = \frac{mg}{\sqrt{2}q} \quad ⑭$$

考点伸展

10. 请画出原题中带电小球 M、N 先后运动的轨迹示意图。

专题三　万有引力与航天

1. 2014年新课标理综Ⅰ卷第19题

太阳系各行星几乎在同一平面内沿同一方向绕太阳做圆周运动。当地球恰好运行到某地外行星和太阳之间，且三者几乎排成一条直线的现象，天文学上称为“行星冲日”。据报道，2014年各行星冲日时间分别是：1月6日木星冲日；4月9日火星冲日；5月11日土星冲日；8月29日海王星冲日；10月8日天王星冲日。已知地球及各地外行星绕太阳运动的轨道半径如下表所示，则下列判断中正确的是(　　)。

	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
轨道半径(AU)	1.0	1.5	5.2	9.5	19	30

A. 各地外行星每年都会出现冲日现象

B. 在2015年内一定会出现木星冲日

C. 天王星相邻两次冲日的时间间隔为土星的一半

D. 地外行星中，海王星相邻两次冲日的时间间隔最短

思路点拨

本题考查开普勒第三定律、匀速圆周运动，关键是追及问题。在比较两颗行星绕行时，公转半径小的角速度大(绕得快)、周期小，所以相邻两次行星冲日的时间间隔应该满足 $(\omega_{地}-\omega_{行})t=2\pi$。根据 $\omega=\frac{2\pi}{T}$ 和开普勒第三定律知道各行星公转的周期与地球公转周期一年的关系，进而判断各个选项。

分析解答

相邻两次行星冲日的时间间隔就是地球比该行星多运动一周的时间，根据开普勒第三定律 $\frac{R^3}{T^2}=k$ 得：$T=\sqrt{R^3/k}$，相邻两次行星冲日的时间间隔 $t=\frac{2\pi}{\omega_{地}-\omega_{行}}=\frac{2\pi}{\frac{2\pi}{T_{地}}-\frac{2\pi}{T_{行}}}=\frac{T_{地}}{1-\frac{T_{地}}{T_{行}}}>T_{地}$，

即相邻两次行星冲日的时间间隔大于1年，A错误；根据木星轨道半径是地球的5.2倍，木星周期大于11年，小于12年，所以木星冲日的时间间隔大于12/11年，小于1.1年。由于今年的冲日时间是1月6日，所以下次木星冲日在2015年，B正确；由于木星相邻两次冲日的时间间隔的一半还不到一年，而所有行星冲日的相邻间隔都超过1年，所以天王星相邻两次的冲日的时间不可能是土星的一半，C错误；根据海王星的轨道半径最大，周期最大，可判断海王星的时间间隔最短，D正确。故选项B、D正确。

考点伸展

1.（2016 年浙江模拟卷）宇宙飞船以周期为 T 绕地球做圆周运动时，由于地球遮挡阳光，会经历“日全食”过程，如图 3-1-1 所示。已知地球的半径为 R，地球质量为 M，引力常量为 G，地球自转周期为 T_0。太阳光可看作平行光，宇航员在 A 点测出的张角为 α，则（　　）。

A. 飞船绕地球运动的线速度为 $\dfrac{2\pi R}{T\sin(\alpha/2)}$

B. 一天内飞船经历“日全食”的次数为 T/T_0

C. 飞船每次“日全食”过程的时间为 $\alpha T_0/(2\pi)$

D. 飞船周期为 $T=\dfrac{2\pi R}{\sin(\alpha/2)}\sqrt{\dfrac{R}{GM\sin(\alpha/2)}}$

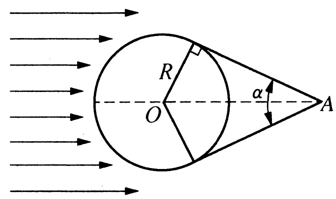


图 3-1-1

2. 2018年北京理综卷第17题

若想检验"使月球绕地球运动的力"与"使苹果落地的力"遵循同样的规律，在已知月地距离约为地球半径60倍的情况下，需要验证(　　)。

A. 地球吸引月球的力约为地球吸引苹果的力的$1/60^2$

B. 月球公转的加速度约为苹果落向地面加速度的$1/60^2$

C. 自由落体在月球表面的加速度约为地球表面的1/6

D. 苹果在月球表面受到的引力约为在地球表面的1/60

思路点拨

本题主要考查万有引力定律及相互作用，审题是关键。"使月球绕地球运动的力"是地球对月球的作用，"使苹果落地的力"是地球对苹果的作用，因此这两个力，都是地球对其他物体的作用。地球对其他物体的作用力是万有引力，遵循万有引力定律，遵循平方反比关系。再根据牛顿第二定律结合圆周运动判断。

分析解答

因为万有引力的大小与两个物体的质量都有关系，选项A因为苹果的质量与月球的质量未知，所以无法判断它们所受引力的大小关系，因此选项A是错误的；根据牛顿第二定律和万有引力定律可知：$\frac{GMM_{月}}{(60r)^2}=M_{月}a_{月}$，$\frac{GMm}{r^2}=ma$；整理可以得到：$a_{月}=\frac{1}{60^2}a$，故选项B正确；在月球表面处：$G\frac{M_{月}m'}{r_{月}^2}=m'g_{月}$，由于月球本身的半径大小未知，故无法求出月球表面和地面表面重力加速度的关系，故选项C错误；苹果在月球表面受到引力为：$F'=G\frac{M_{月}m}{r_{月}^2}$，由于月球本身的半径大小未知，故无法求出苹果在月球表面受到的引力与地球表面引力之间的关系，故选项D错误。因此本题的选项为B。

考点伸展

2. (2019年全国理综Ⅰ卷)在星球M上将一轻弹簧竖直固定在水平桌面上，把物体P轻放在弹簧上端，P由静止向下运动，物体的加速度a与弹簧的压缩量x间的关系如图3-2-1中实线所示。在另一星球N上用完全相同的弹簧，改用物体Q完成同样的过程，其$a-x$关系如图3-2-1中虚线所示，假设两星球均为质量均匀分布的球体。已知星球M的半径是星球N的3倍，则(　　)。

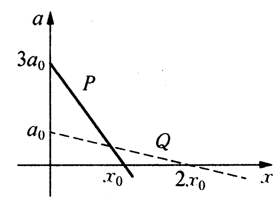


图3-2-1

A. M与N的密度相等

B. Q的质量是P的3倍

C. Q下落过程中的最大动能是P的4倍

D. Q下落过程中弹簧的最大压缩量是P的4倍

3. 2018 年新课标理综Ⅰ卷第 20 题

2017 年，人类第一次直接探测到来自双中子星合并的引力波。根据科学家们复原的过程，在两颗中子星合并前约 100 s 时，它们相距约 400 km，绕二者连线上的某点每秒转动 12 圈，将两颗中子星都看作是质量均匀分布的球体，由这些数据、万有引力常量并利用牛顿力学知识，可以估算出这一时刻两颗中子星（　　）。

A．质量之积

B．质量之和

C．速率之和

D．各自的自转角速度

思路点拨

此题以最新科学发现为情景，考查天体运动、万有引力定律、匀速圆周运动，主要考点是天体运行时万有引力提供天体做匀速圆周运动的向心力。本题的关键是双星模型，没有中心天体，双星环绕共同的中心运动，有相同的角速度。另外特别注意环绕半径与双星之间距离的不同。

分析解答

双中子星做匀速圆周运动，双星之间的万有引力提供做圆周运动所需的向心力。已知两个中子星做匀速圆周运动的频率 $f = 12$ Hz（周期 $T = 1/12$ s），可得，$G\frac{m_1m_2}{r^2} = m_1r_1(2\pi f)^2$，$G\frac{m_1m_2}{r^2} = m_2r_2(2\pi f)^2$，$r_1 + r_2 = r = 400$ km，联立解得：$(m_1 + m_2) = (2\pi f)^2Gr^3$，选项 B 正确，A 错误；由 $v_1 = \omega r_1 = 2\pi fr_1$，$v_2 = \omega r_2 = 2\pi fr_2$，联立解得：$v_1 + v_2 = 2\pi fr$，所以选项 C 正确；不能得出各自自转的角速度，选项 D 错误。

考点伸展

3.（2017 年浙江省选考 4 月卷第 11 题）如图 3－3－1 所示，设行星绕太阳的运动是匀速圆周运动，金星自身的半径是火星的 n 倍，质量为火星的 k 倍。不考虑行星自转的影响，则（　　）。

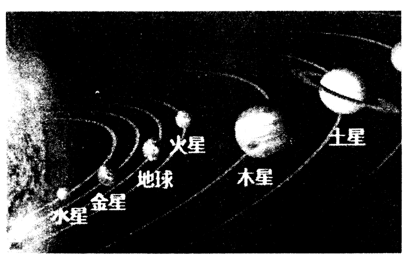


图 3－3－1

A．金星表面的重力加速度是火星的$\frac{k}{n}$倍

B．金星的“第一宇宙速度”是火星的$\sqrt{\frac{k}{n}}$倍

C．金星绕太阳运动的加速度比火星小

D．金星绕太阳运动的周期比火星大

4. 2015 年安徽理综卷物理第 24 题

由三颗星体构成的系统，忽略其他星体对它们的作用，存在着一种运动形式：三颗星体在相互之间的万有引力作用下，分别位于等边三角形的三个顶点上，绕某一共同的圆心 O 在三角形所在的平面内做相同角速度的圆周运动（图 3－4－1 所示为 A、B、C 三颗星体质量不相同时的一般情况）。若 A 星体质量为 $2m$，B、C 两星体的质量均为 m，三角形的边长为 a，求：

(1) A 星体所受合力大小 F_A；

(2) B 星体所受合力大小 F_B；

(3) C 星体的轨道半径 R_C；

(4) 三星体做圆周运动的周期 T。

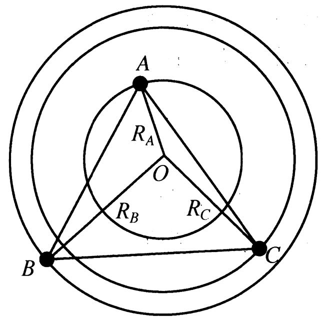


图 3－4－1

思路点拨

1. 由于 A、B、C 三颗星体绕共同的圆心 O 做匀速圆周运动，故 A、B、C 受到的合力均指向圆心 O，即 A、B、C 受到的万有引力在沿垂直于半径方向的合力为零。对 A 研究，由于 B 对 A 的万有引力 F_{BA} 与 C 对 A 的万有引力 F_{CA} 大小相等，故两力与半径 AO 方向的夹角相等，均为 30°；对 B 研究，C 对 B 的万有引力 F_{CB} 与 A 对 B 的万有引力 F_{AB} 大小不等，故将两力分解，两力沿垂直于半径 BO 方向的分力等大反向，即垂直于半径 BO 方向的合力为零，据此求出 F_{AB} 与 BO 方向的夹角 θ，从而求出 B 受到的合力 F_B。

2. 本题中 B、C 两星体的质量相等，则 B、C 两星体的受力特征和运动规律完全相同，根据对称性分析，两星体运行轨道重合，即两星体的轨道半径相等，$R_B=R_C$，从而将对 R_C 的求解转化成对 R_B 的求解。由于△OBC 为等腰三角形，由几何关系列式：$2R_B\cos(60°-\theta)=a$，即可求得 R_B 的值。

3. 由于星球 B 受到的合力及半径 R_B 已求得，可根据牛顿第二定律列式 $F_B=m\frac{4\pi^2}{T^2}R_B$ 求出三星体做圆周运动的周期 T。

满分解答

解：题图中给出了 A、B、C 三颗星体质量不相同时的一般情况，A、B、C 三颗星体在不同的轨道上绕共同的中心 O 做匀速圆周运动。若 A 星体质量为 $2m$，B、C 两星体的质量均为 m 时，B、C 两星体的受力特征和运动规律完全相同，根据对称性分析，B、C 两星体运行轨道重合，如图所示。

(1) 取 A 星体为研究对象，A 星体分别受到 B、C 星体对它的万有引力作用，方向分别指向 B、C 星体，如图 3－4－2 所示。因为 B、C 两星体的质量均为 m，由万有引力定律可得

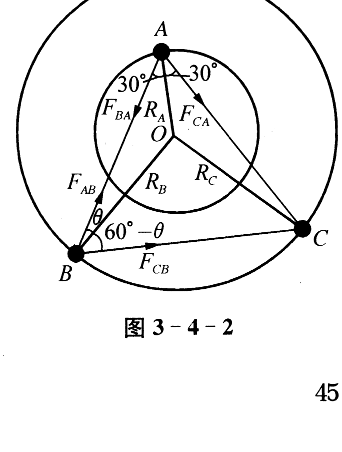


图 3－4－2

$$F_{BA}=F_{CA}=G\frac{2m^2}{a^2} \quad ①$$

由于 A、B、C 三颗星体绕共同的圆心 O 在等边三角形所在的平面内做匀速圆周运动，故 A 受到的合力指向圆心 O，即 F_{BA} 与 F_{CA} 两力方向与半径 AO 所成的角度相等，均为 30°，因此 A 星体所受合力大小为

$$F_A=F_{BA}\cos 30°+F_{CA}\cos 30°=2\sqrt{3}\frac{Gm^2}{a^2} \quad ②$$

(2) 取 B 星体为研究对象，B 星体分别受到 A、C 星体对它的万有引力作用，方向分别指向 A、C 星体，如图所示。由万有引力定律可得

$$F_{AB}=G\frac{2m^2}{a^2} \quad ③$$

$$F_{CB}=G\frac{m^2}{a^2} \quad ④$$

设 F_{AB} 方向与半径 BO 所成的角度为 θ，根据几何关系可知 F_{CB} 方向与半径 BO 所成的角度为 $(60°-\theta)$。依题意，B 受到的合力也指向圆心 O，即在垂直 BO 方向的合力为 0，可列式

$$F_{AB}\sin\theta=F_{CB}\sin(60°-\theta) \quad ⑤$$

由③④⑤解得：$\tan\theta=\frac{\sqrt{3}}{5}$，$\sin\theta=\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{7}}$，$\cos\theta=\frac{5}{2\sqrt{7}}$。

因此 B 星体所受合力大小为

$$F_B=F_{AB}\cos\theta+F_{CB}\cos(60°-\theta)=\sqrt{7}\frac{Gm^2}{a^2} \quad ⑥$$

(3) 由于 B、C 两星体的质量相等，根据对称性分析，B、C 两星体运行轨道重合，如图所示，B、C 两星体运动的轨道半径相等，即 $R_B=R_C$。在等腰$\triangle OBC$中，由几何关系得

$$2R_B\cos(60°-\theta)=a \quad ⑦$$

即可得

$$R_B=R_C=\frac{a}{2\cos(60°-\theta)}=\frac{\sqrt{7}}{4}a \quad ⑧$$

(4) 三星体做圆周运动的周期相等，对 B 星体研究，由牛顿第二定律可得

$$F_B=m\frac{4\pi^2}{T^2}R_B \quad ⑨$$

由⑥⑧⑨式解得

$$T=\pi\sqrt{\frac{a^3}{Gm}} \quad ⑩$$

考点伸展

4.（1）如原题，求 A 星体的轨道半径 R_A；

（2）如原题条件，是否有可能在圆心 O 处还存在一个星体，A、B、C 三颗星体在相互之间的万有引力作用及圆心 O 处的星体对它的万有引力的共同作用下，绕共同的圆心 O 做相同角速度的圆周运动。如果存在，求圆心 O 处星体的质量 M；如果不存在，请说明理由。

专题四　功和能

1. 2015 年江苏物理卷第 9 题

如图 4-1-1 所示，轻质弹簧一端固定，另一端与一质量为 m、套在粗糙竖直固定杆 A 处的圆环相连，弹簧水平且处于原长。圆环从 A 处由静止开始下滑，经过 B 处的速度最大，到达 C 处的速度为零，$AC=h$。圆环在 C 处获得一竖直向上的速度 v，恰好能回到 A。弹簧始终在弹性限度内，重力加速度为 g。则圆环(　　)。

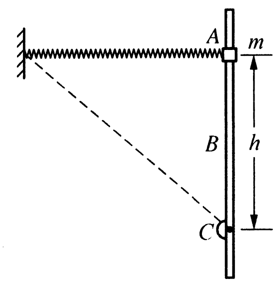


图 4-1-1

A. 下滑过程中，加速度一直减小

B. 下滑过程中，克服摩擦力做的功为 $\frac{1}{4}mv^2$

C. 在 C 处，弹簧的弹性势能为 $\frac{1}{4}mv^2-mgh$

D. 上滑经过 B 的速度大于下滑经过 B 的速度

思路点拨

本题以圆环套在竖直杆上做变加速运动的模型来考查学生对力与运动的关系、功能关系的掌握情况。我们可以根据题干的描述对圆环的运动作定性的分析，开始圆环在重力的作用下向下加速，在运动过程中弹簧被拉长，弹力变大，经过 B 处的速度最大，圆环的重力势能转化为弹簧的弹性势能、圆环的动能、因摩擦产生的内能；到达 C 处的速度为零，显然从 B 到 C 过程中，圆环减速，圆环的机械能转化为弹簧的弹性势能和因摩擦产生的内能；反之，当圆环获得速度后从 C 上滑的过程中，圆环的动能和弹簧的弹性势能转化为圆环的重力势能和因摩擦产生的内能。圆环在下滑和上滑过程中，对应任何一个相同位置所受的滑动摩擦力大小相同，则上滑过程和下滑过程中，尽管摩擦力为变力，但其所做功的相同。

分析解答

由题意知，圆环从 A 到 C 先加速后减速，到达 B 处的加速度减小为零，故加速度先减小后增大，故选项 A 错误；根据能量守恒和功能关系，从 A 到 C 有 $mgh=W_f+E_p$，从 C 到 A 有 $\frac{1}{2}mv^2+E_p=mgh+W_f$，联立解得：$W_f=\frac{1}{4}mv^2$，$E_p=mgh-\frac{1}{4}mv^2$，所以选项 B 正确，C 错误；根据能量守恒和功能关系，从 A 到 B 有 $mgh_1=\frac{1}{2}mv_{B1}^2+\Delta E_{p1}+W_{f1}$，从 C 到 B 有 $\frac{1}{2}mv^2+\Delta E_{p2}=\frac{1}{2}mv_{B2}^2+W_{f2}+mgh_2$，又有 $\frac{1}{2}mv^2+E_p=mgh+W_f$，联列可得 $v_{B2}>v_{B1}$，所以 D 正确。因此本题的正确选项为 BD。

考点伸展

1.（2019 年江苏物理卷）如图 4-1-2 所示，轻质弹簧的左端固定，并处于自然状态。小物块的质量为 m，从 A 点向左沿水平地面运动，压缩弹簧后被弹回，运动到 A 点恰好静止。物块向左运动的最大距离为 s，与地面间的动摩擦因数为 μ，重力加速度为 g，弹簧的形变未超出弹性限度。在上述过程中（　　）。

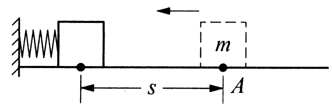


图 4-1-2

A．弹簧的最大弹力为 μmg

B．物块克服摩擦力做的功为 $2\mu mgs$

C．弹簧的最大弹性势能为 μmgs

D．物块在 A 点的初速度为 $\sqrt{2\mu gs}$

2. 2015 年新课标理综Ⅰ卷第 17 题

如图 4-2-1 所示，一半径为 R、粗糙程度处处相同的半圆形轨道如图 4-2-1 放置，三点连线 POQ 水平。一质量为 m 的质点自 P 点上方高度 R 处由静止开始下落，恰好从 P 点进入轨道，质点滑到轨道最低点 N 时，对轨道的压力为 $4mg$，g 为重力加速度的大小，用 W 表示质点从 P 运动到 N 点的过程中克服摩擦力所做的功，则(　　)。

A. $W=\frac{1}{2}mgR$，质点恰好可以到达 Q 点

B. $W>\frac{1}{2}mgR$，质点不能到达 Q 点

C. $W=\frac{1}{2}mgR$，质点到达 Q 点后，继续上升一段距离

D. $W<\frac{1}{2}mgR$，质点到达 Q 点后，继续上升一段距离

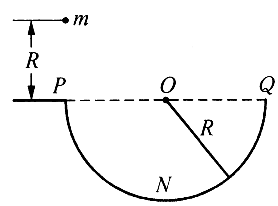


图 4-2-1

思路点拨

本题考查非匀速圆周运动、滑动摩擦力、动能定理、功能关系，重点关注在竖直面内做非匀速圆周运动时向心力的来源。根据 N 处质点的向心力公式可知质点在 N 点的动能，然后从释放点到 N 根据动能定理可以求得 W。结合功能关系，在机械能减少的情况下可知质点从 P 到 N 和从 N 到 Q 过程中，在等高处的速度是 $v_{PN}>v_{NQ}$，根据轨道对质点的支持力与重力的分力一起提供向心力可判断质点从 P 到 N 的摩擦力大于从 N 到 Q 的摩擦力，两段摩擦力做功是不同的 $W_{NQ}<W_{PN}$。

分析解答

根据动能定理可得质点在 P 点的动能 $E_{kP}=mgR$，根据牛顿第三定律轨道对质点的支持力 F_N 与质点对轨道的压力 F'_N 大小相等为 $4mg$，由牛顿第二定律及向心力公式 $4mg-mg=m\frac{v_N^2}{R}$ 得 $v_N=\sqrt{3gR}$，所以 N 点的动能 $E_{kN}=\frac{3}{2}mgR$，从释放点到 N 点过程由动能定理可得 $2mgR-W=E_{kN}$，得克服摩擦力做功 $W=\frac{1}{2}mgR$。质点在运动过程中机械能的减少量就等于克服摩擦力所做的功，再根据对称性可知质点从 N 到 Q 过程中的速度小于从 P 到 N 过程中对应高度的速度，轨道弹力小于从 P 到 N 过程中对应高度的弹力，由于滑动摩擦力 $F_f=\mu F_N$，轨道摩擦力小于从 P 到 N 过程中对应高度的摩擦力，故从 N 到 Q 质点克服摩擦力做功 $W_{NQ}<W=\frac{1}{2}mgR$，然后对质点从 N 到 Q 由动能定理 $-mgR-W_{NQ}=E_{kQ}-\frac{3}{2}mgR$，得 $E_{kQ}>0$，仍会向上运动一段距离，选项 C 正确。

考点伸展

2.（2017 年浙江省选考 4 月卷第 13 题）图 4-2-2 中给出了某一通关游戏的示意图，安装在轨道 AB 上可上下移动弹射器，能水平射出速度大小可调节的弹丸，弹丸射出口在 B 点的正

上方，竖直平面内的半圆弧 BCD 的半径 $R=2.0\ \text{m}$，直径 BD 水平且与轨道 AB 处在同一竖直平面内，小孔 P 和圆心 O 连线与水平方向夹角为 $37°$，游戏要求弹丸垂直于 P 点圆弧切线方向射入小孔 P 就能进行下一关，为了能通关，弹射器离 B 点的高度和弹丸射出的初速度分别是（　　）。（不计空气阻力，$\sin 37°=0.6$，$\cos 37°=0.8$）

A. $0.15\ \text{m/s}$，$4\sqrt{3}\ \text{m/s}$

B. $1.50\ \text{m/s}$，$4\sqrt{3}\ \text{m/s}$

C. $0.15\ \text{m/s}$，$2\sqrt{6}\ \text{m/s}$

D. $1.50\ \text{m/s}$，$2\sqrt{6}\ \text{m/s}$

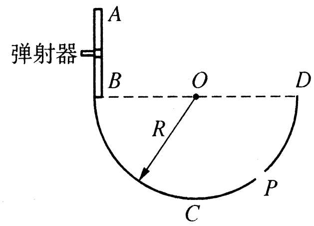


图 4-2-2

3. 2017 年江苏物理卷第 9 题

如图 4-3-1 所示，三个小球 A、B、C 的质量均为 m，A 与 B、C 间通过铰链用轻杆连接，杆长为 L，B、C 置于水平地面上，用一轻质弹簧连接，弹簧处于原长。现 A 由静止释放下降到最低点，两轻杆间夹角 α 由 60° 变为 120°，A、B、C 在同一竖直平面内运动，弹簧在弹性限度内，忽略一切摩擦，重力加速度为 g。则此下降过程中(　　)。

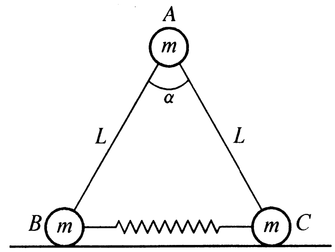


图 4-3-1

A. A 的动能达到最大前，B 受到地面的支持力小于 $\frac{3}{2}mg$

B. A 的动能最大时，B 受到地面的支持力等于 $\frac{3}{2}mg$

C. 弹簧的弹性势能最大时，A 的加速度方向竖直向下

D. 弹簧的弹性势能最大值为 $\frac{\sqrt{3}}{2}mgL$

思路点拨

解答本题的关键是弄清楚小球 A 在运动过程中的受力情况，知道在平衡位置时受力平衡，加速度方向向下属于失重、加速度方向向上属于超重。难点是理解小球 A 的动能达到最大时，其加速度为零。A 的动能最大时受力平衡，根据平衡条件求解地面支持力，根据超重失重现象分析 A 的动能达到最大前，B 受到地面的支持力大小；再根据功能关系分析弹簧的弹性势能最大值。

分析解答

A 在达到动能最大之前一定是做加速运动，达到最大动能之后则是减速运动，显然 A 在达到最大动能时，其加速度为零，处于平衡状态，设 B 和 C 受到地面的支持力大小均为 F，此时整体在竖直方向受力平衡，可得 $2F=3mg$，所以 $F=\frac{3}{2}mg$；在 A 的动能达到最大前一直是加速下降，处于失重情况，所以 B 受到地面的支持力小于 $\frac{3}{2}mg$，故选项 A、B 正确；当 A 达到最低点时动能为零，此时弹簧伸到最长，其弹性势能最大，A 的加速度方向向上，故选项 C 错误；A 从开始到最低点过程中下落的高度为：$h=L\sin 60^\circ-L\sin 30^\circ$，根据功能关系可知，小球 A 的机械能全部转化为弹簧的弹性势能，即弹簧的弹性势能最大值为 $E_P=mgh=\frac{\sqrt{3}-1}{2}mgL$，故选项 D 错误。本题的正确答案为 AB。

考点伸展

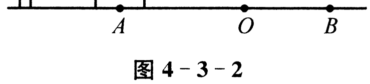


图 4-3-2

3.（2018 年江苏物理卷）如图 4-3-2 所示，轻质弹簧一端固定，另一端连接一小物块，O 点为弹簧在原长时物块的位

置。物块由 A 点静止释放，沿粗糙程度相同的水平面向右运动，最远到达 B 点。在从 A 到 B 的过程中，物块(　　)。

A．加速度先减小后增大

B．经过 O 点时的速度最大

C．所受弹簧弹力始终做正功

D．所受弹簧弹力做的功等于克服摩擦力做的功

4. 2016年浙江模拟卷

如图4-4-1所示，工厂利用皮带传输机依次把每包货物从地面运送到高出水平地面的平台上，平台离地面的高度为h。传输机的皮带以一定的速度v顺时针转动且不打滑。将货物轻轻地放在皮带底端。货物在皮带上相对滑动时，会留下痕迹。已知每包货物质量为m，与皮带间的动摩擦因数均为μ，皮带倾角为θ，$\tan\theta<\mu$。重力加速度为g，可以认为最大静摩擦力等于滑动摩擦力，则(　　)。

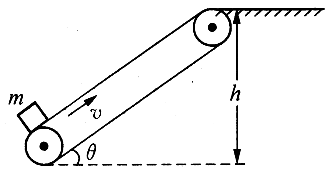


图4-4-1

A. 运送货物时电动机对皮带做的功等于货物增加的机械能

B. 皮带上留下的痕迹长度可能为$\dfrac{v^2}{\mu g\cos\theta-g\sin\theta}$

C. 若其他量不变，增大速度v，皮带运送每包货物所用的时间可能不变

D. 皮带运送每包货物的过程中摩擦生热可能为$\dfrac{\mu mgh}{\tan\theta}$

思路点拨

本题考查牛顿第二定律、功能关系、匀变速直线运动的规律，重点关注摩擦生热和电动机多增加的功。传送带问题中经常关注摩擦生热的计算，其计算关系为$Q=f\Delta x$，其中f为滑动摩擦力，Δx为货物相对传送带运动的距离。而电动机多增加的功可以通过两种方式计算，一是直接计算皮带受到的摩擦力做功，因为电动机给皮带的力要跟皮带受到的摩擦力平衡；二是根据功能关系来计算，电动机需要多做的功就等于货物增加的机械能和货物与皮带之间的摩擦生热。

分析解答

由题意知，货物在皮带上运动可能有两种情况：一是到达平台之前就已经匀速；二是到达平台之前还未匀速。不论是哪一种情况运送货物时电动机对皮带做的功都等于货物增加的机械能与摩擦生热之和，所以选项A错误；皮带上留下的痕迹长度其实就是货物与皮带间的相对位移，若是第一种情况那么由牛顿第二定律知$\mu mg\cos\theta-mg\sin\theta=ma$，运动学公式$v=at$，$\Delta x=vt-\dfrac{1}{2}at^2$解得$\Delta x=\dfrac{v^2}{2(\mu g\cos\theta-g\sin\theta)}$，所以选项B错误；如果出现一个特例，货物到达台面刚刚与皮带共速，则$\Delta x=\dfrac{h}{\sin\theta}$，所以皮带运送每包货物的过程中摩擦生热可能为$Q=\mu mg\cos\theta\cdot\dfrac{h}{\sin\theta}=\dfrac{\mu mgh}{\tan\theta}$，所以选项D正确；皮带运送每包货物所用的时间，若是第二种情况，则全程匀加速，由运动学的公式$\dfrac{h}{\sin\theta}=\dfrac{1}{2}at_0^2$，可以求得货物运动的时间保持不变，且为$t_0=\sqrt{\dfrac{2h}{\sin\theta(\mu g\cos\theta-g\sin\theta)}}$，所以选项C正确。故正确答案为CD。

考点伸展

4.（2019年陕西省模拟题）如图4－4－2所示，水平传送带两端A、B间的距离为L，传送带以速度v沿顺时针方向运动，一个质量为m的小物体以一定的初速度从A端滑上传送带，运动到B端，此过程中物块先做匀加速直线运动后做匀速直线运动，物块做匀加速直线运动的时间与做匀速直线运动时间相等，两过程中物块运动的位移之比为2∶3，重力加速度为g，传送带速度大小不变。下列说法中正确的是（　　）。

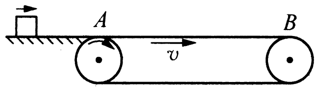


图4－4－2

A．物块的初速度大小为$\frac{v}{2}$

B．物块做匀加速直线运动的时间为$\frac{3L}{5v}$

C．物块与传送带间的动摩擦因数为$\frac{10v^2}{9gL}$

D．整个过程中物块与传动带因摩擦产生的热量为$\frac{mv^2}{9}$

5. 2016年浙江模拟卷

如图4-5-1甲所示，在倾角为θ的光滑斜面上，有一个质量为m的物体在沿斜面方向的力F的作用下由静止开始运动，物体的机械能E随位移x的变化关系如图乙所示。其中$0\sim x_1$过程的图线是曲线，$x_1\sim x_2$过程的图线为平行于x轴的直线，则下列说法中正确的是(　　)。

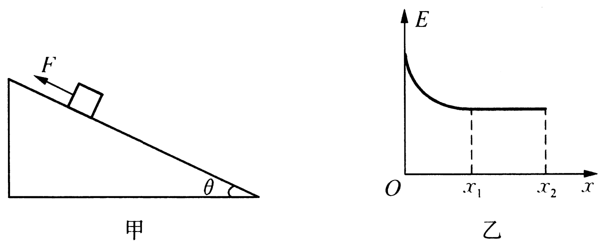


图4-5-1

A. 物体在沿斜面向下运动

B. 在$0\sim x_1$过程中，物体的加速度一直减小

C. 在$x_1\sim x_2$过程中，物体先减速运动再匀速运动

D. 在$x_1\sim x_2$过程中，物体的加速度为$g\sin\theta$

思路点拨

本题考查牛顿第二定律、功能关系，关键在机械能不守恒时$\Delta E=W_{非}=Fx$，在E-x的图象中斜率就是F，所以在$0\sim x_1$过程中，力F逐渐减小；在$x_1\sim x_2$过程中力F为零。根据牛顿第二定律可知物体的加速度及运动情况。

分析解答

由功能关系知，$W_{非}=\Delta E$，其中$W_{非}$为除重力和弹力以外的力所做的功，此题中为力F所做的功。在机械能随位移变化的图象中曲线的斜率即为力F，在$0\sim x_1$过程中斜率逐渐减小则说明力F逐渐减小；在$x_1\sim x_2$过程中斜率为零机械能不变则说明力F为零。因为机械能一开始减少，所以$W_{非}<0$，则物体沿斜面向下运动，选项A正确；在$0\sim x_1$过程中对物体受力分析可知牛顿第二定律表达式$mg\sin\theta-F=ma$，而力F逐渐减小，所以加速度逐渐增大，选项B错误；在$0\sim x_1$过程中物体先做加速度增大的加速运动，在$x_1\sim x_2$过程中物体做加速度为$g\sin\theta$的匀加速直线运动，选项C错误，选项D正确。故正确答案为AD。

考点伸展

5. (2019年4月浙江选考卷)如图4-5-2所示为某一游戏的局部简化示意图。D为弹射装置，AB是长为21 m的水平轨道，倾斜直轨道BC固定在竖直放置的半径为$R=10$ m的圆形支架上，B为圆弧的最低点，

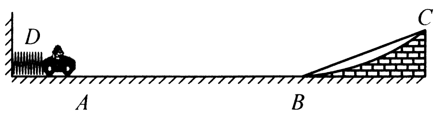


图4-5-2

轨道 AB 与 BC 平滑连接，且在同一竖直平面内。某次游戏中，无动力小车在弹射装置 D 的作用下，以 $v_0 = 10\ \mathrm{m/s}$ 的速度滑上轨道 AB，并恰好能冲到轨道 BC 的最高点。已知小车在轨道 AB 上受到的摩擦力为其重量的 0.2 倍，轨道 BC 光滑，则小车从 A 到 C 的运动时间是（　　）。

A. 5 s　　B. 4.8 s　　C. 4.4 s　　D. 3 s

6. 2018 年 11 月浙江选考卷第 20 题

如图 4-6-1 所示，在地面上竖直固定了刻度尺和轻质弹簧，弹簧原长时上端与刻度尺上的 A 点等高。质量 $m=0.5\ \text{kg}$ 的篮球静止在弹簧正上方，其底端距 A 点高度 $h_1=1.10\ \text{m}$。篮球静止释放，测得第一次撞击弹簧时，弹簧的最大形变量 $x_1=0.15\ \text{m}$，第一次反弹至最高点，篮球底端距 A 点的高度 $h_2=0.873\ \text{m}$，篮球多次反弹后静止在弹簧的上端，此时弹簧的形变量 $x_2=0.01\ \text{m}$，弹性势能 $E_p=0.025\ \text{J}$。若篮球运动时受到的空气阻力大小恒定，忽略篮球与弹簧碰撞时的能量损失和篮球的形变，弹簧形变在弹性限度范围内。求：

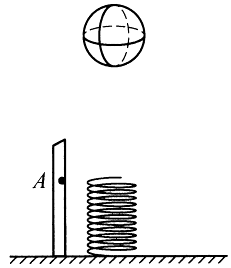


图 4-6-1

(1) 弹簧的劲度系数；

(2) 篮球在运动过程中受到的空气阻力；

(3) 篮球在整个运动过程中通过的路程；

(4) 篮球在整个运动过程中速度最大的位置。

思路点拨

1. 由篮球多次反弹后静止在弹簧的上端，可知此时篮球受到的合力为 0，由此可得弹簧的弹力大小，并求得弹簧的劲度系数。

2. 对篮球由静止释放到第一次反弹至最高点过程研究，该过程篮球动能的增量为 0，重力对篮球做正功为 $W_G=mg(h_1-h_2)$，空气阻力对篮球做负功为 $W_{F_f}=-F_f(h_1+h_2+2x_1)$，由动能定理即可求得空气阻力 F_f 的大小。

3. 对篮球的整个运动过程研究，篮球的动能增量为 0，重力对篮球做正功为 $W_G=mg(h_1+x_2)$，空气阻力对篮球做负功为 $W_{F_f}=-F_f x$，式中 x 为篮球在整个运动过程中通过的路程，由于篮球最终静止时弹簧有一定的形变，故该过程弹簧弹力对篮球做负功，由功能关系可知弹簧对篮球做的功等于弹簧弹性势能的增量，即 $W_F=-\Delta E_p$；对篮球由动能定理即可求出篮球在整个运动过程中通过的路程 x。

4. 因运动过程中受到大小恒定的空气阻力，篮球的机械能会不断减小，故最大速度一定出现在第一次下降或反弹过程中的平衡位置。至于到底是哪个位置需要再具体分析。

分析解答

解：(1) 由篮球最终静止在弹簧上端，可知篮球受到的合力为 0，由

$$mg=kx_2 \quad ①$$

可得弹簧的劲度系数

$$k=\frac{mg}{x_2}=500\ \text{N/m} \quad ②$$

(2) 对篮球由静止释放到第一次反弹至最高点过程研究，由动能定理可列式

$$W_G + W_{F_f} = 0 \quad ③$$

即有

$$mg(h_1 - h_2) - F_f(h_1 + h_2 + 2x_1) = 0 \quad ④$$

解得篮球在运动过程中受到的空气阻力

$$F_f = \frac{mg(h_1 - h_2)}{h_1 + h_2 + 2x_1} \approx 0.5\ \text{N} \quad ⑤$$

(3) 对篮球的整个运动过程研究，由动能定理可列式

$$W'_G + W'_{F_f} + W_F = 0 \quad ⑥$$

式中重力做功 $W'_G = mg(h_1 + x_2)$，空气阻力做功 $W'_{F_f} = -F_f x$，x 为篮球在整个运动过程中通过的路程，弹簧弹力做功 $W_F = -\Delta E_p$，代入上式得

$$mg(h_1 + x_2) - F_f x - \Delta E_p = 0 \quad ⑦$$

得篮球在整个运动过程中通过的路程

$$x = \frac{mg(h_1 + x_2) - \Delta E_p}{F_f} = 11.05\ \text{m} \quad ⑧$$

(4) 由于在运动过程中受到大小恒定的空气阻力作用，篮球的机械能会不断减小，故在整个运动过程中最大速度出现在第一次下降或反弹过程中。当篮球第一次下降经过 1 位置时速度达到 v_m，则有

$$mg = k\Delta x_1 + F_f \quad ⑨$$

可得弹簧的压缩量

$$\Delta x_1 = \frac{mg - F_f}{k} = 0.009\ \text{m} \quad ⑩$$

篮球下降到最低点被反弹后经过 2 位置时，速度又达到 v'_m，有

$$mg + F_f = k\Delta x_2 \quad ⑪$$

可知弹簧的压缩量 $\Delta x_2 > \Delta x_1$，故 2 位置在 1 位置的下方。篮球第一次在下降过程中通过 2 位置的速度大于上升过程中通过 2 位置的 v'_m，而篮球第一次下降过程中通过 2 位置的速度又小于 v_m，因此 $v_m > v'_m$。故全过程速度最大的位置是第一次下降过程中的平衡位置，即 A 点下方 0.009 m 处。

考点伸展

6. 如原题所述，求：(提示：可以用 F-x 图象下的“面积”代表力 F 所做的功)

(1) 篮球在整个运动过程中的速度最大值；

(2) 要使篮球每次反弹后均恰能回到第一次释放的位置，则篮球释放时或回到释放高度时需对篮球做多少功?

7. 2015年广东理综卷第36题

如图4-7-1所示，一条带有圆轨道的长轨道水平固定，圆轨道竖直，底端分别与两侧的直轨道相切，半径$R=0.5\,m$。物块A以$v_0=6\,m/s$的速度滑入圆轨道，滑过最高点Q，再沿圆轨道滑出后，与直轨道上P处静止的物块B碰撞，碰后粘在一起运动。P点左侧轨道光滑，右侧轨道呈粗糙段、光滑段交替排列，每段长度都为$L=0.1\,m$。物块与各粗糙段间的动摩擦因数都为$\mu=0.1$，A、B的质量均为$m=1\,kg$（重力加速度g取$10\,m/s^2$，A、B视为质点，碰撞时间极短）。

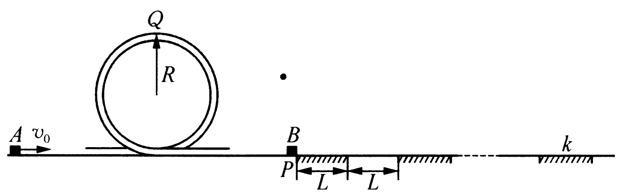


图4-7-1

(1) 求A滑过Q点时的速度大小v和受到的弹力大小F；

(2) 若碰后AB最终停止在第k个粗糙段上，求k的数值；

(3) 求碰后AB滑至第n个($n<k$)光滑段上的速度v_n与n的关系式。

思路点拨

(1) 物块A在光滑的圆轨道中运动时，只有重力做功，机械能守恒；A在最高点Q时，所需的向心力由重力和轨道弹力的合力提供。

(2) 由题意，物块A滑出光滑轨道后，与B发生完全非弹性碰撞，碰撞过程中有机械能损失，故应先确定碰后AB的速度，再利用动能定理求解。而题中“碰撞时间极短”，即意味着A、B碰撞过程中内力远大于外力，碰撞前后A、B组成的系统动量守恒。

(3) 碰后AB滑至第n个($n<k$)光滑段上的速度，即为AB滑过第n个粗糙段时的速度。

满分解答

解：(1) 物块A滑入圆轨道到达Q的过程中机械能守恒，有

$$\frac{1}{2}mv_0^2=\frac{1}{2}mv^2+2mgR \quad ①$$

代入数据，得$v=4\,m/s$。

物块A运动到圆轨道的最高点Q时，由重力和轨道的弹力F提供向心力，由牛顿第二定律，有

$$F+mg=m\frac{v^2}{R} \quad ②$$

代入数据，得$F=22\,N$。

(2) A从圆轨道右侧滑出后，与B相碰，因两者碰撞时间极短，碰撞过程中内力远大于外力，

故碰撞前后 A、B 组成的系统动量守恒。设碰后 AB 速度为 v_1，有

$$mv_0 = 2mv_1 \quad ③$$

所以 $v_1 = 3\ \mathrm{m/s}$。

在 A、B 碰后一起向右运动的过程中，支持力 $F_N = 2mg$，在粗糙段受到的滑动摩擦力 $F_f = \mu F_N = 2\mu mg$。设 AB 在粗糙段滑行的总长度为 kL，由动能定理，有

$$-\mu(2m)g \cdot kL = 0 - \frac{1}{2}(2m)v_1^2 \quad ④$$

由③④式联立，得 $k = 45$。

(3) A、B 碰后到滑至第 n 个 ($n<k$) 光滑段，已在粗糙段上滑过了 nL 的距离，由动能定理，有

$$-\mu(2m)g \cdot nL = \frac{1}{2}(2m)v_n^2 - \frac{1}{2}(2m)v_1^2 \quad ⑤$$

解得 $v_n = \sqrt{v_1^2 - 2\mu gnL} = \sqrt{9-0.2n}\ \mathrm{m/s}$。

考点伸展

7. 若原题中物块 A 的质量未知且物块 A 沿圆轨道滑出后，与直轨道上静止的物块 B 发生弹性碰撞，碰后 A 被反向弹回沿轨道滑过最高点 Q 时与轨道间恰无相互作用，B 的质量为 $m = 1\ \mathrm{kg}$，其余条件不变，求 A 的质量和 B 在水平轨道上运动的时间。

专题五　碰撞和动量

1. 2019 年湖南模拟题

一质量为 m_1 的物体以 v_0 的初速度与另一质量为 m_2 的静止物体发生碰撞，其中 $m_2=km_1$，$k<1$。碰撞可分为完全弹性碰撞、完全非弹性碰撞以及非弹性碰撞。碰撞后两物体速度分别为 v_1 和 v_2。假设碰撞在一维上进行，且一个物体不可能穿过另一个物体。物体 1 撞后与碰撞前速度之比 $r=\frac{v_1}{v_0}$ 的取值范围是（　　）。

A. $\frac{1-k}{1+k}\leqslant r\leqslant 1$

B. $\frac{1-k}{1+k}\leqslant r\leqslant \frac{1}{1+k}$

C. $0\leqslant r\leqslant \frac{2}{1+k}$

D. $\frac{1}{1+k}\leqslant r\leqslant \frac{2}{1+k}$

思路点拨

本题以碰撞为背景，考查学生对于动量守恒定律和碰撞规律的掌握情况。在碰撞过程中系统动量守恒，其能量关系，可分为三个阶段讨论，(1)运动小球与静止小球发生碰撞，开始运动小球挤压静止小球，运动小球减速，静止小球加速，当两小球速度相等时，挤压程度最大，此时对应完全非弹性碰撞；(2)此后挤压的小球可部分恢复原状，静止小球加速，运动小球继续减速，在没有完全恢复原状之前，对应的是非弹性碰撞；(3)如果挤压部分完全恢复原状，则对应完全弹性碰撞。分阶段分析碰撞过程，即可求出运动小球碰撞后的最大速度和最小速度。

分析解答

若发生弹性碰撞，小球 1 的碰后的速度最小，则由动量守恒

$$m_1v_0=m_1v_1+m_2v_2 \qquad ①$$

由能量关系

$$\frac{1}{2}m_1v_0^2=\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2 \qquad ②$$

解得 $v_1=\frac{m_1-m_2}{m_1+m_2}v_0$，则$\frac{v_1}{v_0}=\frac{1-k}{1+k}$；

若发生完全非弹性碰撞，小球 1 碰撞后的速度最大，则由动量守恒

$$m_1v_0=(m_1+m_2)v \qquad ③$$

解得 $v_1=v_2=\frac{m_1v_0}{m_1+m_2}$，则$\frac{v_1}{v_0}=\frac{1}{1+k}$。故 $\frac{1-k}{1+k}\leqslant r\leqslant\frac{1}{1+k}$，选项 B 正确。

考点伸展

1.（2018湖南模拟题）如图5－1－1所示，A、B两小球静止在光滑水平面上，用轻弹簧相连接，A球的质量小于B球的质量。若用锤子敲击A球使A得到v的速度，弹簧压缩到最短时的长度为L_1；若用锤子敲击B球使B得到v的速度，弹簧压缩到最短时的长度为L_2，则L_1与L_2的大小关系为（　　）。（两次敲击均沿AB方向）

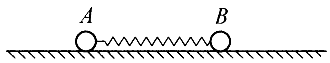


图5－1－1

A. $L_1 > L_2$　　B. $L_1 < L_2$　　C. $L_1 = L_2$　　D. 不能确定

2. 2016年北京理综卷第24题

(1) 动量定理可以表示为$\Delta p=F\Delta t$，其中动量p和力F都是矢量。在运用动量定理处理二维问题时，可以在相互垂直的x、y两个方向上分别研究。例如，质量为m的小球斜射到木板上，入射的角度是θ，碰撞后弹出的角度也是θ，碰撞前后的速度大小都是v，如图5-2-1(a)所示，碰撞过程中忽略小球所受重力。

a. 分别求出碰撞前后x、y方向小球的动量变化；

b. 分析说明小球对木板的作用力的方向。

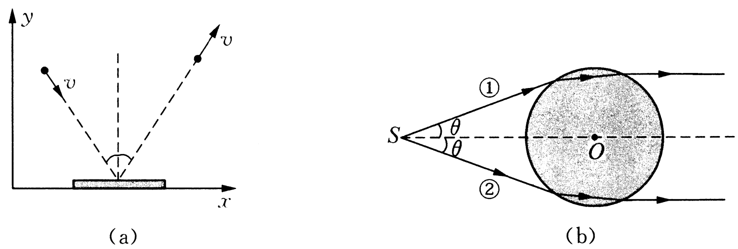


图5-2-1

(2) 激光束可以看作是粒子流，其中的粒子以相同的动量沿光传播方向运动。激光照射到物体上，在发生反射、折射和吸收现象的同时，也会对物体产生作用。光镊效应就是一个实例，激光束可以像镊子一样抓住细胞等微小颗粒。一束激光经S点后被分成若干细光束，若不考虑光的反射和吸收，其中光束①和②穿过介质小球的光路如图5-2-1(b)所示。图中O点是介质小球的球心，入射时光束①和②与SO的夹角均为θ，出射时光束均与SO平行。请在下面两种情况下，分析说明两光束因折射对小球产生的合力的方向。

a. 光束①和②强度相同；

b. 光束①比②的强度大。

思路点拨

本题考查的核心是动量定理矢量性和牛顿第三定律。

1. 小球撞击木板前后的动量发生了变化，但碰撞前后的动量并不在一直线上，不在一直线的矢量运算遵循平行四边形或三角形定则；也可以通过正交分解简化为代数运算。题中已经建立好直角坐标系，只需把碰撞前后的动量沿x、y方向进行正交分解，再运用动量定理，即可求出小球对木板在x、y方向所受的作用力，再进行合成，即可知道小球对木板的总作用力。根据牛顿第三定律可求出木板对小球的作用力。

2. 激光通过小球时，把激光看成是粒子流，则粒子与小球的相互作用与第(1)小题的相互作用类似，因此只须建立直角坐标即可解决问题。

满分解答

解：(1) a. 在沿x方向上，小球动量变化为

$$\Delta p_x = mv\sin\theta - mv\sin\theta = 0 \quad ①$$

在沿 y 方向上，小球动量变化为

$$\Delta p_y = mv\cos\theta - (-mv\cos\theta) = 2mv\cos\theta \quad ②$$

方向沿 y 轴正方向。

b. 根据动量定理可知，木板对小球作用力沿 y 轴正方向，根据牛顿第三定律可得小球对木板作用力的方向沿 y 轴负方向

（2）a. 仅考虑光的折射，设 Δt 时间内每束光穿过小球的光子数为 n，每个光子动量的大小为 p。建立如图 5-2-2 所示的 Oxy 直角坐标系，则这些光子进入小球前的总动量沿 x、y 方向分解。则

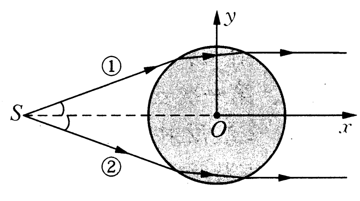


图 5-2-2

$$p_{1x} = np\cos\theta + np\cos\theta = 2np\cos\theta \quad ③$$

$$p_{1y} = np\sin\theta - np\sin\theta = 0 \quad ④$$

所以入射前粒子的总动量沿 x 轴方向，其大小为

$$p_1 = 2np\cos\theta \quad ⑤$$

从小球出射的光束方向与 x 轴平行，则出射光子的总动量为

$$p_2 = 2np \quad ⑥$$

方向也沿 x 轴正方向。根据动量定理可得

$$F\Delta t = p_2 - p_1 = 2np(1-\cos\theta) > 0 \quad ⑦$$

可知，小球对这些光子的作用力 F 的方向沿 SO 向右；根据牛顿第三定律，两光束对小球的合力的方向沿 OS 向左。

b. 设 Δt 时间内，光束①穿过小球的粒子数为 n_1，光束②穿过小球的粒子数为 n_2，因为光束①比②的强度大，所以 $n_1 > n_2$。同样把入射前后的光子的动量沿 x、y 方向分解，则这些光子进入小球前沿 x 方向的总动量

$$p_{1x} = n_1 p\cos\theta + n_2 p\cos\theta \quad ⑧$$

从小球出射光束方向与 x 轴平行，则出射光子沿 x 方向的总动量为

$$p_{2x} = n_1 p + n_2 p \quad ⑨$$

方向也沿 x 轴正方向。

根据动量定理可得

$$F_x\Delta t = p_{2x} - p_{1x} = (n_1 + n_2)p(1-\cos\theta) > 0 \quad ⑩$$

同理可知，两光束对小球的 x 方向的作用力沿 x 轴负方向。

这些粒子进入小球前沿 y 方向的总动量为

$$p_{1y} = (n_1 - n_2)p\sin\theta \quad ⑪$$

从小球出射光束方向与 x 轴平行，则从小球出射时的沿 y 方向总动量

$$p_{2y} = 0 \quad ⑫$$

根据动量定理有

$$F_y\Delta t = p_{2y} - p_{1y} = -(n_1 - n_2)p\sin\theta < 0 \qquad ⑬$$

可知，小球对这些粒子的作用力 F_y 的方向沿 y 轴负方向，根据牛顿第三定律，两光束对小球的作用力沿 y 轴正方向，所以两光束对小球的合力的方向指向左上方。

考点伸展

2. 光子不仅有能量，还有动量，光照射到某个面上就会产生压力，宇宙飞船可以采用光压作为动力。给飞船安上面积很大的薄膜，正对着太阳光，靠太阳光在薄膜上产生压力推动宇宙飞船前进。第一次安装的是反射率极高的薄膜，第二次安装的是吸收率极高的薄膜，那么(　　)。

A. 安装反射率极高的薄膜，飞船的加速度大

B. 安装吸收率极高的薄膜，飞船的加速度大

C. 两种情况下，由于飞船的质量一样，飞船的加速度大小都一样

D. 两种情况下，飞船的加速度不好比较

3. 2016年10月浙江选考卷第23题

如图5-3-1所示，在x轴的上方存在垂直纸面向里，磁感应强度大小为B_0的匀强磁场。位于x轴下方离子源C发射质量为m，电荷量为q的一束负离子，其初速度大小范围为$0\sim\sqrt{3}v_0$。这束离子经电势差为$U=\frac{mv_0^2}{2q}$的电场加速后，从小孔O(坐标原点)垂直x轴并垂直磁场射入磁场区域，最后打到x轴上。在x轴上$2a\sim3a$区间水平固定放置一探测板$\left(a=\frac{mv_0}{qB_0}\right)$。假设每秒射入磁场的离子总数为$N_0$，打到$x$轴上的离子数均匀分布(离子重力不计)。

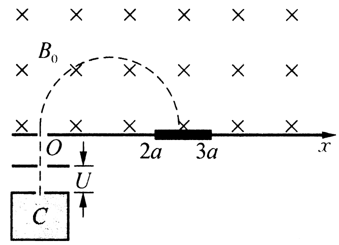


图5-3-1

(1) 求离子束从小孔O射入磁场后打到x轴的区间；

(2) 调整磁感应强度的大小，可使速度最大的离子恰好打在探测板右端，求此时的磁感应强度大小B_1；

(3) 保持磁感应强度B_1不变，求每秒打在探测板上的离子数N；若打在板上的离子80%被板吸收，20%被反向弹回，弹回速度大小为打板前速度大小的0.6倍。求探测板受到的作用力大小。

思路点拨

1. 先由动能定理求出离子束经加速电场加速后的速度范围，根据离子在磁场中做圆周运动的半径公式$r=\frac{mv}{qB}$得到离子束在磁场中运动的半径大小范围，由于离子在磁场中运动半个周期后打到x轴上，故离子打到x轴的位置与O点的距离为$2r$。

2. 当只调整磁感应强度B的大小来改变离子在磁场中的运动半径r时，关系式$r\cdot B=$常数，由半径r的变化值即可得到B的改变值。

3. 当保持磁感应强度B不变时，离子在磁场中运动的速度v与对应的半径r的关系满足$v\propto r$，由打在探测板上的离子运动的半径范围即可得到离子运动的速度范围，根据打到x轴上的离子数是均匀分布的条件，便可求得每秒打在探测板上的离子数。

4. 基于动量定理可求得打在板上的离子受到的作用力，再根据牛顿第三定律可知探测板受到的作用力大小，值得注意的有三点：一是要知道打在板上的总离子数；二是要明白打在板上的离子的速度大小是各不相等的，自左向右线性增大，故考虑取其平均值来计算离子束打板前后的动量改变；三是要区别80%的离子打到板上后被板吸收，而20%的离子却是被板反弹的。

满分解答

解：(1) 根据动能定理，可得

$$qU=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_1^2 \qquad ①$$

即

$$v=\sqrt{v_1^2+\frac{2qU}{m}} \tag{②}$$

将 $0\leqslant v_1\leqslant\sqrt{3}v_0$，$U=\dfrac{mv_0^2}{2q}$ 代入上式，可得

$$v_0\leqslant v\leqslant 2v_0 \tag{③}$$

设离子在磁场中运动的半径为 R，由离子在磁场中所受的洛伦兹力提供离子做圆周运动的向心力，可列式

$$qvB_0=\frac{mv^2}{R} \tag{④}$$

得到

$$R=\frac{mv}{qB_0} \tag{⑤}$$

离子打在 x 轴上的坐标表达式为

$$x=2R=\frac{2mv}{qB_0} \tag{⑥}$$

代入数据得

$$2a\leqslant x\leqslant 4a \tag{⑦}$$

(2) 当速度最大的离子打在探测板右端时，有

$$3a=2R_1 \tag{⑧}$$

由于 $R_1=\dfrac{2mv_0}{qB_1}$，解得

$$B_1=\frac{4}{3}B_0 \tag{⑨}$$

另解：当只调整磁感应强度 B 的大小来改变离子在磁场中的运动半径 r 时，关系式 $r\cdot B=$ 常数，由于半径 r 由 $2a$ 减小到 $\dfrac{3}{2}a$，故磁感应强度 B 由 B_0 增大到 $\dfrac{4}{3}B_0$。

(3) 当保持磁感应强度 B_1 不变时，离子在磁场中运动的速度 v 与对应的半径 r 的关系满足 $v\propto r$，由于离子束能打到探测板的实际范围为 $2a\leqslant x\leqslant 3a$，即 $a\leqslant r\leqslant\dfrac{3}{2}a$，而当 $r=\dfrac{3}{2}a$ 时，$v'=2v_0$，故可得打在板上的离子对应的速度范围为

$$\frac{4}{3}v_0\leqslant v'\leqslant 2v_0 \tag{⑩}$$

可得每秒打在探测板上的离子数为

$$N=N_0\frac{2v_0-\frac{4}{3}v_0}{2v_0-v_0}=\frac{2}{3}N_0 \tag{⑪}$$

对被板吸收的离子由动量定理可列式

$$F_{吸} \cdot \Delta t = 80\% N \cdot \Delta t \cdot m\bar{v} \qquad ⑫$$

故吸收的离子受到板的作用力大小为

$$F_{吸} = 0.8 \times \frac{2}{3} N_0 \cdot m \cdot \frac{\frac{4}{3}v_0 + 2v_0}{2} = \frac{8}{9} N_0 m v_0 \qquad ⑬$$

对被板反弹的离子由动量定理可列式

$$F_{反} \cdot \Delta t = 20\% N \cdot \Delta t \cdot [0.6m\bar{v} - (-m\bar{v})] \qquad ⑭$$

故反弹的离子受到板的作用力大小为

$$F_{反} = 0.2 \times \frac{2}{3} N_0 \times 1.6m \cdot \frac{\frac{4}{3}v_0 + 2v_0}{2} = \frac{16}{45} N_0 m v_0 \qquad ⑮$$

根据牛顿第三定律，探测板受到的作用力大小为

$$F = F_{吸} + F_{反} = \frac{56}{45} N_0 m v_0 \qquad ⑯$$

考点伸展

3. 如原题所述，若磁场只存在于 $x \leqslant 3a$ 区域（图 5－3－2 中虚线右侧不存在磁场），且保持磁感应强度 B_1 不变。打在探测板上的离子既有被吸收又有被弹回的，且弹回速度大小为打板前速度大小的 0.6 倍，弹回速度方向与打板前速度方向相反，假设离子被板反弹的时间可忽略不计，求离子在磁场中运动的最长时间。

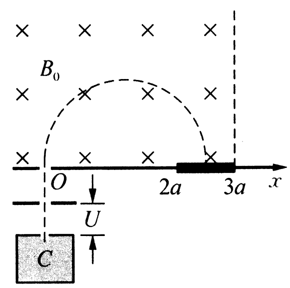


图 5－3－2

4. 2019 年全国理综Ⅰ卷第 25 题

竖直面内一倾斜轨道与一足够长的水平轨道通过一小段光滑圆弧平滑连接，小物块 B 静止于水平轨道的最左端，如图 5－4－1 所示。$t=0$ 时刻，小物块 A 在倾斜轨道上从静止开始下滑，一段时间后与 B 发生弹性碰撞（碰撞时间极短）；当 A 返回到倾斜轨道上的 P 点（图中未标出）时，速度减为 0，此时对其施加一外力，使其在倾斜轨道上保持静止。物块 A 运动的 $v-t$ 图象如图 5－4－2 所示，图中的 v_1 和 t_1 均为未知量。已知 A 的质量为 m，初始时 A 与 B 的高度差为 H，重力加速度大小为 g，不计空气阻力。

（1）求物块 B 的质量；

（2）在图 5－4－2 所描述的整个运动过程中，求物块 A 克服摩擦力所做的功；

（3）已知两物块与轨道间的动摩擦因数均相等，在物块 B 停止运动后，改变物块与轨道间的动摩擦因数，然后将 A 从 P 点释放，一段时间后 A 刚好能与 B 再次碰上。求改变前后动摩擦因数的比值。

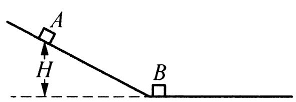


图 5－4－1

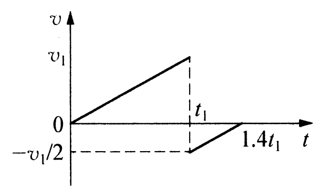


图 5－4－2

思路点拨

本题是多过程与碰撞结合的力学综合问题，考查了弹性碰撞模型以及速度图象的识别，知识点涉及功、加速度等基本概念和牛顿第二定律、动能定理等规律的应用。从解题方法看，应该从动力学角度、动量角度、能量角度去分析物体经历的过程，整、分结合地考虑物体 A 和物体 B 组成的系统，优先考虑系统满足的守恒律。物体 A 先做匀加速直线运动，与 B 碰撞过程为典型的运动碰静止模型，碰后 A 沿斜面向上做匀减速直线运动至速度减为零，随后外力使之保持静止；碰后物体 B 在水平面上做匀减速直线运动。本题的特点是已知量较少，貌似缺少已知条件，但在解答过程不难发现，这些量与所求问题无关，只要抓住物理量之间的联系问题即可迎刃而解。

满分解答

解：（1）设物块 A、B 发生碰撞后一瞬间的速度分别为 v_A、v_B，弹性碰撞过程遵守动量守恒定律，取碰前一瞬间 A 的初速度方向为正方向，有

$$mv_1 = mv_A + m_B v_B \quad ①$$

根据机械能守恒定律，有

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_A^2 + \frac{1}{2}m_B v_B^2 \quad ②$$

联立①②式解得

$$v_A=\frac{m-m_B}{m+m_B}v_1,\ v_B=\frac{2m}{m+m_B}v_1 \qquad ③$$

由 v-t 图象可知

$$v_A=-\frac{1}{2}v_1 \qquad ④$$

联立③④式解得 $m_B=3m$。

(2) 设斜面的倾角为 θ，根据牛顿第二定律，当物块 A 沿斜面下滑时，有

$$mg\sin\theta-f=ma_1 \qquad ⑤$$

当物体 A 沿斜面上滑时，有

$$mg\sin\theta+f=ma_2 \qquad ⑥$$

由 v-t 图象可知 $$a_1=\frac{v_1}{t_1},\ a_2=\frac{5v_1}{4t_1} \qquad ⑦$$

联立⑤⑥⑦式得 $$f=\frac{1}{9}mg\sin\theta \qquad ⑧$$

结合速度图象，A 物块沿斜面下滑的位移大小满足

$$\frac{H}{\sin\theta}=\frac{1}{2}v_1t_1 \qquad ⑨$$

设 P 点离水平面的高度为 h，则碰后 A 反弹沿斜面上滑位移为

$$\frac{h}{\sin\theta}=\frac{\frac{v_1}{2}+0}{2}\cdot 0.4t_1=0.1v_1t_1 \qquad ⑩$$

联立⑨⑩式可得 $$h=\frac{1}{5}H \qquad ⑪$$

故在图 5-4-2 描述的整个过程中，摩擦力对物块 A 做的功

$$W_f=-f\left(\frac{H}{\sin\theta}+\frac{h}{\sin\theta}\right) \qquad ⑫$$

联立⑧⑪⑫式得 $W_f=-\frac{2}{15}mgH$，即克服摩擦力做功为$\frac{2}{15}mgH$。

(3) 设物块 B 在水平面上滑行的最远距离为 x_B，原动摩擦因数为 μ，对 A、B 组成的系统，根据动能定理有

$$mg(H-h)-\mu mg\frac{H+h}{\tan\theta}-\mu m_Bgx_B=0 \qquad ⑬$$

设改变后动摩擦因数为 μ'，对 A 从 P 点释放后恰好滑到物块 B 位置过程，根据动能定理有

$$mgh-\mu' mg\frac{h}{\tan\theta}-\mu' mgx_B=0 \qquad ⑭$$

又由第(2)小题的结论可知

$$|W_f| = \frac{2}{15}mgH = \mu mg\frac{H+h}{\tan\theta}, \text{得} \tan\theta = 9\mu \quad ⑮$$

联立⑬⑭⑮式得，改变前后的动摩擦因数之比为 $\frac{\mu'}{\mu} = \frac{11}{9}$。

考点伸展

4. 原题中若水平地面上各处的动摩擦因数满足 $\mu = \frac{\mu_0}{x_0}x$，x 为水平面上某处离开左端的距离，求物块 B 向右运动的时间。

5. 2019 年全国理综Ⅲ卷第 25 题

静止在水平地面上的两小物块 A、B，质量分别为 $m_A=1.0\,\text{kg}$，$m_B=4.0\,\text{kg}$；两者之间有一被压缩的微型弹簧，A 与其右侧的竖直墙壁距离 $l=1.0\,\text{m}$，如图5-5-1所示。某时刻，将压缩的微型弹簧释放，使 A、B 瞬间分离，两物块获得的动能之和为 $E_k=10.0\,\text{J}$。释放后，A 沿着与墙壁垂直的方向向右运动。A、B 与地面之间的动摩擦因数均为 $\mu=0.20$。重力加速度取 $g=10\,\text{m/s}^2$。A、B 运动过程中所涉及的碰撞均为弹性碰撞且碰撞时间极短。

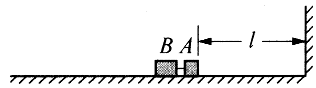


图 5-5-1

(1) 求弹簧释放后瞬间 A、B 速度的大小；

(2) 物块 A、B 中的哪一个先停止？该物块刚停止时 A 与 B 之间的距离是多少？

(3) A 和 B 都停止后，A 与 B 之间的距离是多少？

思路点拨

(1) “将压缩的微型弹簧释放，使 A、B 瞬间分离”意味着：在很短的时间内，A、B 位置没有变化，A、B 及微型弹簧（质量可忽略不计）组成的系统内力远大于外力，系统动量守恒。

(2) A、B 分离后，均做匀减速直线运动，易判 B 先停。在 B 速度减为 0 的过程中，A 可能已经与墙碰撞向左运动，但考虑到 A 与墙间发生的是弹性碰撞，即碰后 A 只改变速度方向，不改变速度大小，故无论此碰撞是否发生，A 的路程 s_A 都可用 $s_A=v_At-\frac{1}{2}at^2$ 进行求解。

(3) 在(2)问的前提下，先选用动能定理确定 A 向左运动停下来之前是否能与 B 发生碰撞。若能，可利用 A、B 的弹性碰撞规律，由动量守恒定律、机械能守恒定律确定碰撞后 A、B 的速度大小和方向，最后结合空间关系，列式求解即可。

满分解答

解：(1) 设弹簧释放瞬间 A 和 B 的速度大小分别为 v_A、v_B，以向右为正，由动量守恒定律和题给条件有

$$0=m_Av_A-m_Bv_B \quad ①$$

$$E_k=\frac{1}{2}m_Av_A^2+\frac{1}{2}m_Bv_B^2 \quad ②$$

联立①②式并代入题给数据得

$$v_A=4.0\,\text{m/s},\ v_B=1.0\,\text{m/s} \quad ③$$

(2) A、B 两物块与地面间的动摩擦因数相等，因而两者滑动时加速度大小相等，设为 a。假设 A 和 B 发生碰撞前，已经有一个物块停止，此物块应为弹簧释放后速度较小的 B。设从弹簧释放到 B 停止所需时间为 t，B 向左运动的路程为 s_B，则有

$$\mu m_Bg=m_Ba \quad ④$$

$$s_B=v_Bt-\frac{1}{2}at^2 \quad ⑤$$

$$v_B - at = 0 \quad ⑥$$

在时间 t 内，A 可能与墙发生弹性碰撞，碰撞后 A 将向左运动，碰撞并不改变 A 的速度大小，所以无论此碰撞是否发生，A 在时间 t 内的路程 s_A 都可表示为

$$s_A = v_A t - \frac{1}{2}at^2 \quad ⑦$$

联立③④⑤⑥⑦式并代入题给数据得

$$s_A = 1.75\ \text{m},\ s_B = 0.25\ \text{m} \quad ⑧$$

这表明在时间 t 内 A 已与墙壁发生碰撞，但没有与 B 发生碰撞，此时 A 位于出发点右边 0.25 m处。B 位于出发点左边 0.25 m 处，两物块之间的距离 s 为

$$s = 0.25\ \text{m} + 0.25\ \text{m} = 0.50\ \text{m} \quad ⑨$$

(3) t 时刻后 A 将继续向左运动，假设它能与静止的 B 碰撞，碰撞时速度的大小为 v'_A，由动能定理有

$$-\mu m_A g(2l + s_B) = \frac{1}{2}m_A v_A'^2 - \frac{1}{2}m_A v_A^2 \quad ⑩$$

联立③⑧⑩式并代入题给数据得

$$v'_A = \sqrt{7}\ \text{m/s} \quad ⑪$$

故 A 与 B 将发生碰撞。设碰撞后 A、B 的速度分别为 v''_A 以和 v''_B，以向右为正，由动量守恒定律与机械能守恒定律有

$$m_A(-v'_A) = m_A v''_A + m_B v''_B \quad ⑫$$

$$\frac{1}{2}m_A v_A'^2 = \frac{1}{2}m_A v_A''^2 + \frac{1}{2}m_B v_B''^2 \quad ⑬$$

联立⑪⑫⑬式并代入题给数据得

$$v''_A = \frac{3\sqrt{7}}{5}\ \text{m/s},\ v''_B = -\frac{2\sqrt{7}}{5}\ \text{m/s} \quad ⑭$$

这表明碰撞后 A 将向右运动，B 继续向左运动。设碰撞后 A 向右运动距离为 s'_A 时停止，B 向左运动距离为 s'_B 时停止，由运动学公式

$$2as'_A = v_A''^2,\ 2as'_B = v_B''^2 \quad ⑮$$

由④⑭⑮式及题给数据得

$$s'_A = 0.63\ \text{m},\ s'_B = 0.28\ \text{m} \quad ⑯$$

s'_A 小于碰撞处到墙壁的距离。由上式可得两物块停止后的距离

$$s' = s'_A + s'_B = 0.91\ \text{m} \quad ⑰$$

考点伸展

5. 原题中，若 A 与 B 发生完全非弹性碰撞，其他条件不变，求系统因摩擦而产生的总热量 Q。

第二部分
电学综合

专题六 电路分析

1. 2016年江苏物理卷第8题

如图6-1-1所示的电路中，电源电动势为12 V，内阻为2 Ω，四个电阻的阻值已在图中标出。闭合开关S，下列说法中正确的有(   )。

A. 路端电压为10 V

B. 电源的总功率为10 W

C. a、b间电压的大小为5 V

D. a、b间用导线连接后，电路的总电流为1 A

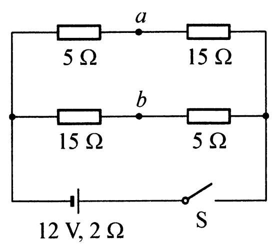


图6-1-1

思路点拨

本题考查闭合电路基本规律。需要用到的规律有：闭合电路欧姆定律$I=\frac{E}{R+r}$，路端电压$U_{外}=IR_{外}$，功率$P=UI$，两点间电势差$U_{ab}=\varphi_a-\varphi_b$。

分析解答

由电路图可知外电路的总电阻为10 Ω，根据闭合电路欧姆定律可得干路电流$I=\frac{E}{R_{外}+r}=1$ A，路端电压$U_{外}=IR_{外}=10$ V，所以A正确；电源的总功率$P=EI=12$ W，故B错误；根据并联电路的特点可得流过a、b电流均为0.5 A，所以$U_{ba}=0.5\times(15-5)=5$ V，故C正确；a、b间用导线连接后，根据电路的连接可求得外电路电阻为7.5 Ω，回路总电阻为9.5 Ω，所以D错误。因此本题的正确选项为AC。

考点伸展

1. (2013年高考安徽理综第19题)用图6-1-2所示的电路可以测量电阻的阻值。图中R_x是待测电阻，R_0是定值电阻，G表是灵敏度很高的电流表，MN是一段均匀的电阻丝。闭合开关，改变滑动头P的位置，当通过电流表G的电流为零时，测得$MP=l_1$，$PN=l_2$，则R_x的阻值为(   )。

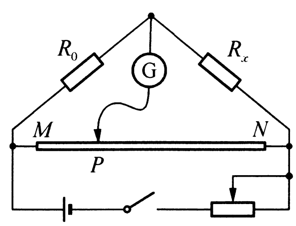


图6-1-2

A. $\frac{l_1}{l_2}R_0$　　B. $\frac{l_1}{l_1+l_2}R_0$

C. $\frac{l_2}{l_1}R_0$　　D. $\frac{l_2}{l_1+l_2}R_0$

2. 2014 年上海物理卷第 18 题

如图 6-2-1 所示，电路中定值电阻阻值 R 大于电源内阻阻值 r，将滑动变阻器滑片向下滑动，理想电压表示数 V_1、V_2、V_3 变化量的绝对值分别为 ΔU_1、ΔU_2、ΔU_3，理想电流表 A 示数变化量的绝对值为 ΔI，则(　　)。

A. A 的示数增大

B. V_2 的示数增大

C. ΔU_3 与 ΔI 的比值大于 r

D. ΔU_1 大于 ΔU_2

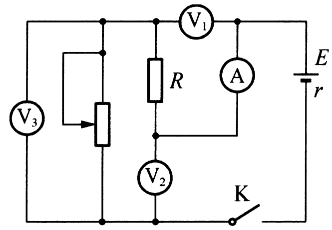


图 6-2-1

思路点拨

本题考查动态电路分析。由题干可知，电路中的电压表和电流表都是理想的，因此可将理想电压表看做断路，将理想电流表看做短路，这样电路就简化成一个串联电路。将滑动变阻器滑片向下滑动，滑动变电阻将减小，各表的读数也将发生变化。

分析解答

由电路图可知，该电路是由滑动变阻器和电阻 R 串联所形成的电路，电路中电压表 V_1 测量电阻 R 两端的电压，电压表 V_3 测量滑动变阻器两端的电压，而电压表 V_2 测量的是路端电压，电流表测量回路中的总电流。当滑动变阻器滑片向下滑动时，滑动变阻器接入电路中的电阻变小，则回路中的总电阻减小。由闭合电路欧姆定律可知，回路中的总电流增大，电阻 R 两端的电压增大，电源的内电压增大，故路端电压减小，即 A 的示数增大，V_1 的示数增大，V_3 的示数减小，V_2 的示数也减小，故 A 正确，B 错误；由上述分析知，V_2 的变化量即 V_3 变化量与 V_1 的变化量之差，即 $\Delta U_2 = \Delta U_3 - \Delta U_1$，而 ΔU_1 与 ΔI 的比值即电阻R 的大小，ΔU_2 与 ΔI 的比值即电阻r 的大小，所以 ΔU_3 与 ΔI 的比值即$R+r$ 的大小大于r，故 C 正确；而电路中定值电阻阻值 R 大于电源内阻阻值 r，所以 ΔU_1 大于 ΔU_2，故 D 正确。因此本题的正确选项为 ACD。

考点伸展

2. (2019 年上海市模拟卷)如图 6-2-2 所示电路，在滑动变阻器的滑片 P 向上端a 滑动过程中，电压表、电流表的示数变化情况为(　　)。

A. 两电表示数都增大

B. 两电表示数都减小

C. 电压表示数减少，电流表示数增大

D. 电压表示数增大，电流表示数减小

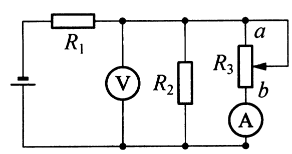


图 6-2-2

3. 2016年全国理综Ⅱ卷第17题

阻值相等的四个电阻，电容器 C 及电池 E（内阻可忽略）连接成如图6-3-1所示电路。开关S断开且电流稳定时，C 所带的电荷量为 Q_1；闭合开关S，电流再次稳定后，C 所带的电荷量为 Q_2。Q_1 与 Q_2 的比值为（　　）。

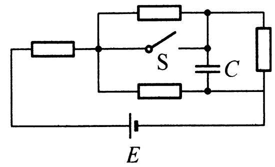


图6-3-1

A. $\frac{2}{5}$　　B. $\frac{1}{2}$

C. $\frac{3}{5}$　　D. $\frac{2}{3}$

思路点拨

本题考查含容电路以及复杂电路的串并联关系。由电容定义式，电容一定时，电容所带电荷与电容两端电压成正比。因题干所给电路图较为复杂，为求出电容两端电压，应将开关S闭合前后的等效电路图分别画出，从而理清各电阻之间的串并联关系。这里应注意：当开关S闭合时，开关正上方的电阻接在了导线两端，被短路。

分析解答

由已知可得：$Q_1=U_1C$，$Q_2=U_2C$，则 $\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{U_1}{U_2}$。

S断开时等效电路如图6-3-2，$U_1=\dfrac{\dfrac{R(R+R)}{(R+R)+R}}{R+\dfrac{R(R+R)}{(R+R)+R}}\cdot E\times\frac{1}{2}=\frac{1}{5}E$。

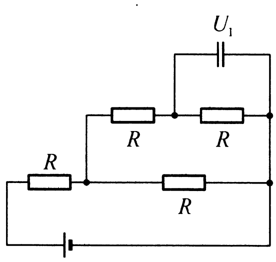


图6-3-2

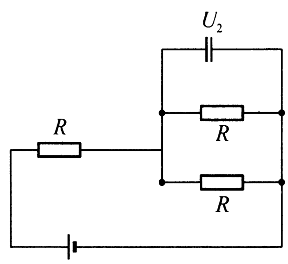


图6-3-3

S闭合时等效电路如图6-3-3，$U_2=\dfrac{\dfrac{R\cdot R}{R+R}}{R+\dfrac{R\cdot R}{R+R}}=\frac{1}{3}E$。

则 $\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{U_1}{U_2}=\frac{3}{5}$。因此本题的正确选项为C。

考点伸展

3.（2018 年江苏物理卷）如图 6－3－4 所示，电源 E 对电容器 C 充电，当 C 两端电压达到 80 V时，闪光灯瞬间导通并发光，C 放电。放电后，闪光灯断开并熄灭，电源再次对 C 充电。这样不断地充电和放电，闪光灯就周期性地发光。该电路（　）。

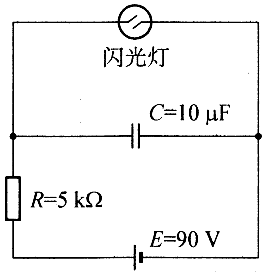


图 6－3－4

A．充电时，通过 R 的电流不变

B．若 R 增大，则充电时间变长

C．若 C 增大，则闪光灯闪光一次通过的电荷量增大

D．若 E 减小为 85 V，闪光灯闪光一次通过的电荷量不变

4. 2017年北京理综卷第19题

图 6-4-1 和图 6-4-2 是教材中演示自感现象的两个电路图，L_1 和 L_2 为电感线圈。实验时，断开开关 S_1 瞬间，灯 A_1 突然闪亮，随后逐渐变暗；闭合开关 S_2，灯 A_2 逐渐变亮，而另一个相同的灯 A_3 立即变亮，最终 A_2 与 A_3 的亮度相同。下列说法正确的是（　　）。

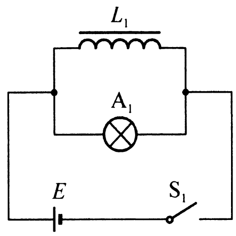


图 6-4-1

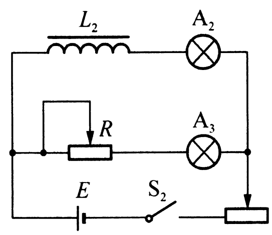


图 6-4-2

A．图 6-4-1 中，A_1 与 L_1 的电阻值相同

B．图 6-4-1 中，闭合 S_1，电路稳定后，A_1 中电流大于 L_1 中电流

C．图 6-4-2 中，变阻器 R 与 L_2 的电阻值相同

D．图 6-4-2 中，闭合 S_2 瞬间，L_2 中电流与变阻器 R 中电流相等

思路点拨

当通过线圈本身的电流变化时，线圈中会产生自感现象，这是一种特殊的电磁感应现象，可运用楞次定律分析自感电动势对电流的影响。闭合开关的瞬间，通过 L 的电流增大，产生自感电动势，根据楞次定律分析电流的变化，判断通过两灯电流的关系。待电路稳定后断开开关，线圈产生自感电动势，分析通过两灯的电流关系，判断两灯是否同时熄灭。

分析解答

断开开关 S_1 瞬间，灯 A_1 突然闪亮，由于线圈 L_1 的自感，通过 L_1 的电流逐渐减小，且通过 A_1，即自感电流会大于原来通过 A_1 的电流，说明闭合 S_1，电路稳定时，通过 A_1 的电流小于通过 L_1 的电流，L_1 的电阻小于 A_1 的电阻，AB 错误；闭合 S_2，电路稳定时，A_2 与 A_3 的亮度相同，说明两支路的电流相同，因此变阻器 R 与 L_2 的电阻值相同，C 正确；闭合开关 S_2，A_2 逐渐变亮，而 A_3 立即变亮，说明 L_2 中电流与变阻器 R 中电流不相等，D 错误。本题的正确选项为 C。

考点伸展

4.（2017 年海南物理卷第 8 题）如图 6-4-3 所示，电阻 R、电容 C 和电感 L 并联后，接入输出电压有效值恒定、频率可调的交流电源。当电路中交流电的频率为 f 时，通过 R、C 和 L 的电流有效值恰好相等。若将频率降低为 $\frac{1}{2}f$，分别用 I_1、I_2 和 I_3 表示此时通过 R、C 和 L 的电流有效值，则（　　）。

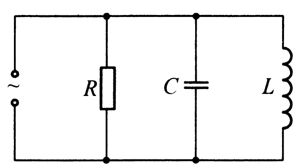


图 6-4-3

A．$I_1 > I_3$　　B．$I_1 > I_2$　　C．$I_3 > I_2$　　D．$I_2 = I_3$

专题七　电场与磁场

1. 2017年全国理综Ⅲ卷第18题

如图7-1-1，在磁感应强度大小为B_0的匀强磁场中，两长直导线P和Q垂直于纸面固定放置，两者之间的距离为l。在两导线中均通有方向垂直于纸面向里的电流I时，纸面内与两导线距离均为l的a点处的磁感应强度为零。如果让P中的电流反向、其他条件不变，则a点处磁感应强度的大小为(　　)。

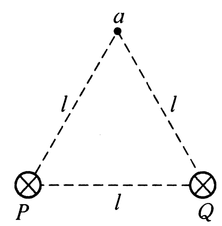


图7-1-1

A. 0　　　　B. $\frac{\sqrt{3}}{3}B_0$

C. $\frac{2\sqrt{3}}{3}B_0$　　　　D. $2B_0$

思路点拨

本题综合考查安培定则的应用，磁场的叠加原理，要求分析通电直导线周围磁场分布情况，根据平行四边形的原则求解合磁场。难点是当P中的电流反向后，P中电流在a点处所产生的磁场方向发生变化，从而使a处合磁场的大小、方向均发生变化。本题的关键是磁场的叠加，首先分析P、Q中电流在a点产生的磁场叠加，然后与匀强磁场叠加，则a处的合磁场为零。当P中的电流反向后，仍先分析P、Q中电流在a点产生的磁场叠加，然后与匀强磁场叠加，求得a处的合磁场的大小。

分析解答

如图7-1-2所示，P、Q中电流在a点产生的磁感应强度大小相等，设为B_1，因为a处的合磁场为零，根据平行四边形法则，P、Q中电流在a点产生的合磁场与B_0等值相反，由几何关系可得$\sqrt{3}B_1=B_0$，如果让P中的电流反向、其他条件不变，如图7-1-3所示，P、Q中电流在a点产生的合磁场由几何关系可知大小仍为B_1，与匀强磁场叠加后，a点处磁感应强度的大小为$B=\sqrt{B_0^2+B_1^2}=\frac{2\sqrt{3}}{3}B_0$，故本题的正确答案为C。

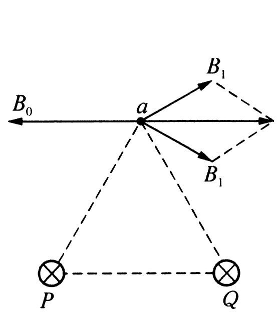


图7-1-2

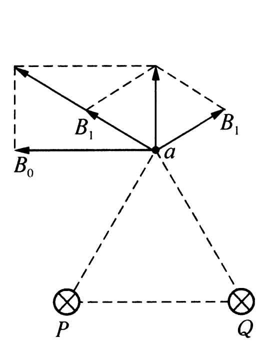


图7-1-3

考点伸展

1.（2018 年全国理综Ⅱ卷）如图 7－1－4 所示，纸面内有两条互相垂直的长直绝缘导线 L_1、L_2，L_1 中的电流方向向左，L_2 中的电流方向向上；L_1 的正上方有 a、b 两点，它们相对于 L_2 对称。整个系统处于匀强外磁场中，外磁场的磁感应强度大小为 B_0，方向垂直于纸面向外。已知 a、b 两点的磁感应强度大小分别为 $\frac{1}{3}B_0$ 和 $\frac{1}{2}B_0$，方向也垂直于纸面向外。则（　　）。

A．流经 L_1 的电流在 b 点产生的磁感应强度大小为 $\frac{7}{12}B_0$

B．流经 L_1 的电流在 a 点产生的磁感应强度大小为 $\frac{1}{12}B_0$

C．流经 L_2 的电流在 b 点产生的磁感应强度大小为 $\frac{1}{12}B_0$

D．流经 L_2 的电流在 a 点产生的磁感应强度大小为 $\frac{7}{12}B_0$

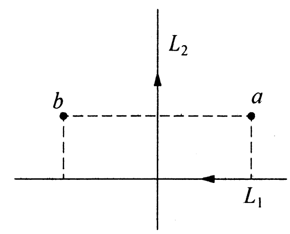


图 7－1－4

2. 2015年浙江模拟卷

物理学中有些问题的结论不一定必须通过计算才能验证,有时只需通过一定的分析就可以判断结论是否正确。如图7-2-1所示为两个彼此平行且共轴的半径分别为R_1和R_2的圆环,两圆环上的电荷量均为$q(q>0)$,而且电荷均匀分布。两圆环的圆心O_1和O_2相距为$2a$,连线的中点为O,轴线上的A点在O点右侧与O点相距为$r(r<a)$。试分析判断下列关于A点处电场强度大小E的表达式(式中k为静电力常量)中正确的是(　　)。

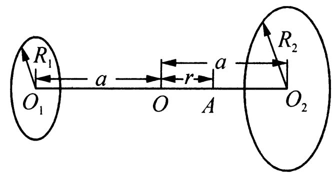


图7-2-1

A. $E=\left|\frac{kqR_1}{[R_1^2+(a+r)^2]}-\frac{kqR_2}{[R_2^2+(a-r)^2]}\right|$

B. $E=\left|\frac{kqR_1}{[R_1^2+(a+r)^2]^{\frac{3}{2}}}-\frac{kqR_2}{[R_2^2+(a-r)^2]^{\frac{3}{2}}}\right|$

C. $E=\left|\frac{kq(a+r)}{[R_1^2+(a+r)^2]}-\frac{kq(a-r)}{[R_2^2+(a-r)^2]}\right|$

D. $E=\left|\frac{kq(a+r)}{[R_1^2+(a+r)^2]^{\frac{3}{2}}}-\frac{kq(a-r)}{[R_2^2+(a-r)^2]^{\frac{3}{2}}}\right|$

思路点拨

本题考查电场强度及场强的叠加,考查学生应用量纲法、特殊值法、极端分析法等解决问题的能力。圆环上的带电量由各点电荷组成,点电荷产生的电场为$E=k\frac{Q}{r^2}$,由量纲法分析各个表达式的单位可先排除错误的选项。当$r=a$时是一种特殊的情况,利用对称性可知右环对A点的场强贡献为零,各表达式的第二项应为零。也可假设圆环的半径$R\to 0$,分析极端情况下圆环带电量对A点的场强贡献。

分析解答

点电荷产生的场强为$E=k\frac{Q}{r^2}$,定性分析各表达式的单位可知选项A、C错误;当$r=a$时,A点变为O_2点,由对称性知右环上的电荷在O_2点产生的场强互相抵消,各表达式的第二项应为零,故选项B错误、D正确。也可以假设$R_1\to 0$,左边圆环变为点电荷,表达式的第一项应变为$k\frac{q}{(a+r)^2}$的形式,故选项B错误。若假设$R_2\to 0$,右边圆环变为点电荷,它对A点场强仍有贡献,但是B选项中的第二项变为零,不符合事实。因此本题答案为D。

考点伸展

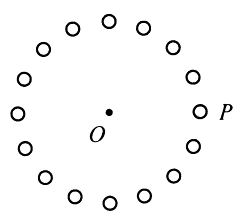


图7-2-2

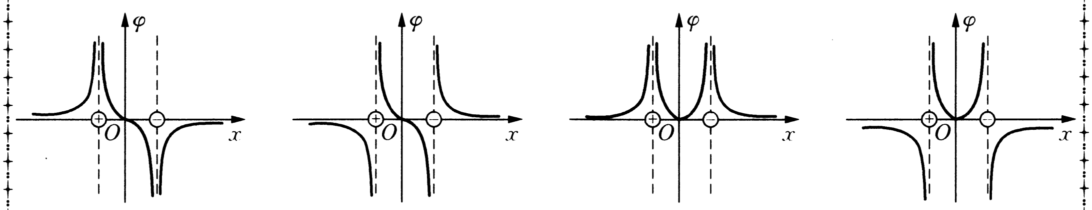
2. (2018年湖北模拟题)如图7-2-2所示,16个电荷量均为$+q(q>0)$的小球(可视为点电荷),均匀分布在半径为R的圆周上。若将圆周上

P 点的一个小球的电量换成 $-2q$，则圆心 O 点处的电场强度的大小为（　　）。

A. $\frac{kq}{R^2}$　　B. $\frac{2kq}{R^2}$　　C. $\frac{3kq}{R^2}$　　D. $\frac{4kq}{R^2}$

3. 2016 年上海模拟卷

两个等量异种点电荷位于 x 轴上，相对原点对称分布，正确描述电势 φ 随位置 x 变化规律的是图(　　)。



A.　　B.　　C.　　D.

思路点拨

本题以常见的等量异种点电荷的电场为载体，考查电势 φ 随位置 x 的变化规律。要求学生熟悉典型电场的电场线分布情况，明确电势升降与电场线指向的关系并能用 $\varphi-x$ 图象表示，突出了对情景转换能力的考查。$\varphi-x$ 图象虽然在教材中没有出现过，但涉及的知识点还是“沿着电场线方向电势降低”。且根据 $E=\dfrac{U}{d}$ 可知，$\varphi-x$ 图象中的某点的斜率表示场强的大小。

分析解答

等量异种点电荷的电场线分布如图 7－3－1 所示，因为沿着电场线方向电势降低，故以正电荷为参考点，沿它的左右两侧向外电势均降低，选项 B、D 错误；因为逆着电场线方向电势升高，故以负电荷为参考点，沿它的左右两侧向外电势均升高，选项 A 正确、C 错误。利用正电荷所在位置电势最高、负电荷所在位置电势最低的结论也可判断只有选项 A 正确；$\varphi-x$ 图象中某点斜率表示场强的大小，等量异种点电荷连线中点的场强不为零，C、D 选项中的图线在原点处的斜率为零，也可判断出 C、D 选项错误。本题的正确选项为 A。

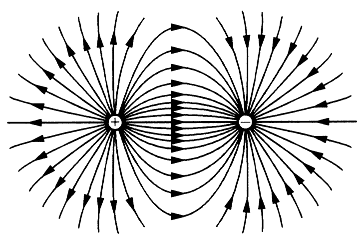


图 7－3－1

考点伸展

3．(2018 年湖北模拟题)两电荷量分别为 q_1 和 q_2 的点电荷固定在 x 轴上的 O、M 两点，规定无穷远处为电势能零点，一带负电的试探电荷在 x 轴上各点具有的电势能随 x 变化关系如图 7－3－2 所示，其中试探电荷在 A、N 两点的电势能为零，在 ND 段中 C 点电势能最大，则下列说法中正确的是(　　)。

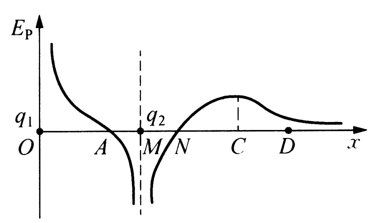


图 7－3－2

A．q_1 为正电荷，q_2 为负电荷

B．q_1 电荷量小于 q_2 的电荷量

C．将一正点电荷从 N 点移到 D 点，电场力先做负功后做正功

D．将一正点电荷从 N 点静止释放后会沿 x 轴正方向运动且到达 C 点时速度最大

4. 2017年新课标理综Ⅲ卷第21题

一匀强电场的方向平行于 xOy 平面，平面内 a、b、c 三点的位置如图 7－4－1 所示，三点的电势分别为 10 V、17 V、26 V。下列说法中正确的是(　　)。

A．电场强度的大小为 2.5 V/cm

B．坐标原点处的电势为 1 V

C．电子在 a 点的电势能比在 b 点的低 7 eV

D．电子从 b 点运动到 c 点，电场力做功为 9 eV

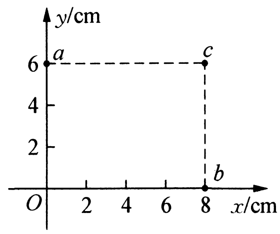


图 7－4－1

思路点拨

本题综合考查匀强电场中电场强度与电势差的关系、等势面与电场线的关系、电场力做功与电势能变化的关系等知识点。解题的关键是寻找等势点，在匀强电场中，电势差 $U=Ed$，即在电场中沿某一直线电势的变化是均匀的，由此找到等势点，根据等势面与电场线相互垂直的关系，且沿电场线方向电势降落，可知电场强度的方向和大小；根据电场力做功与电势能变化的关系：$W=-\Delta E_p$，可以判断带电子在电场中运动时的电势能变化情况，注意电子的带电性。

分析解答

如图 7－4－2 所示，设 a、c 之间的 d 点电势与 b 点相同，则 $\frac{ad}{dc}=\frac{10-17}{17-26}=\frac{7}{9}$，则 d 点坐标为(3.5 cm，6 cm)，连接 bd，即为等势线；过 c 点作 $cf\perp bd$ 交于 f，则 cf 就是电场线，电场方向由 c 指向 f，由几何关系可得 $cf=3.6$ cm，则电场强度 $E=\frac{U}{d}=\frac{26-7}{3.6}$ V/cm，选项 A 正确；因为四边形 $Oacb$ 是矩形，所以有 $U_{ac}=U_{Ob}$，解得坐标原点 O 处的电势为 1 V，选项 B 正确；a 点的电势比 b 点电势低 7 V，电子带负电，所以电子在 a 点的电势能比在 b 点的电势能高 7 eV，选项 C 错误；b 点的电势比 c 点电势低 9 V，电子从 b 点运动到 c 点，电场力做正功为 9 eV，选项 D 正确。故选项 ABD 正确。

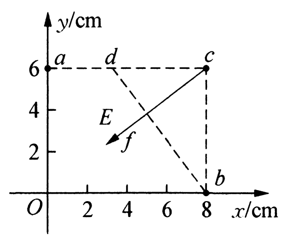


图 7－4－2

考点伸展

4．(2019 全国理综Ⅲ卷)如图 7－4－3 所示，电荷量分别为 q 和 $-q(q>0)$ 的点电荷固定在正方体的两个顶点上，a、b 是正方体的另外两个顶点。则(　　)。

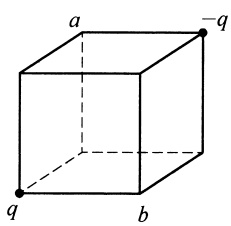


图 7－4－3

A. a 点和 b 点的电势相等

B. a 点和 b 点的电场强度大小相等

C. a 点和 b 点的电场强度方向相同

D. 将负电荷从 a 点移到 b 点,电势能增加

5. 2019 年江苏物理卷第 9 题

如图 7-5-1 所示，$\triangle ABC$ 为等边三角形，电荷量为 $+q$ 的点电荷固定在 A 点。先将一电荷量也为 $+q$ 的点电荷 Q_1 从无穷远处（电势为 0）移到 C 点，此过程中，电场力做功为 $-W$。再将 Q_1 从 C 点沿 CB 移到 B 点并固定。最后将一电荷量为 $-2q$ 的点电荷 Q_2 从无穷远处移到 C 点。下列说法中正确的有（　　）。

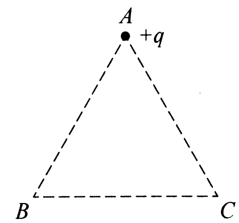


图 7-5-1

A. Q_1 移入之前，C 点的电势为 $\frac{W}{q}$

B. Q_1 从 C 点移到 B 点的过程中，所受电场力做的功为 0

C. Q_2 从无穷远处移到 C 点的过程中，所受电场力做的功为 $2W$

D. Q_2 在移到 C 点后的电势能为 $-4W$

思路点拨

本题主要考查电势和电势能的概念，考查学生电势、电势能、电场力做功之间的关系，通过构造一个场景，考查学生对基本概念的掌握情况。电势是描述电场能的性质的物理量，只跟场源电荷有关，与试探电荷无关，电势是标量。而电势能是电荷在电场中所具有的由位置决定的能，跟电场有关、跟试探电荷有关，当电荷在电场中移动时，电场所做的功等于电势能变化的负值。另外，要考虑正三角的对称性，相对于点 A，点 B、点 C 是对称的。

分析解答

由题意可知，C 点的电势为 $\varphi_C=\frac{E_p}{q}=\frac{-(-W)}{q}=\frac{W}{q}$，故 A 正确；由于 B、C 两点到 A 点（$+q$）的距离相等，相对于 A 点对称，所以 B、C 两点的电势相等，因此 Q_1 从 C 点移到 B 点的过程中，电场力做功为 0，故选项 B 正确；由于 B、C 两点的电势相等，当在 B 点固定 Q_1 后，C 点的电势由 A、B 两处的电荷产生，已知 A 处的电荷在 C 点产生的电势为 $\frac{W}{q}$，根据对称性可知，B 处的电荷在 C 点产生的电势也为 $\frac{W}{q}$，即此时 C 处的电势为 $\frac{2W}{q}$，所以 Q_2 从无穷远移到 C 点过程中，电场力做功为：$W=qU=-2q\times\left(0-\frac{2W}{q}\right)=4W$ 故 C 错误；由于 C 点的电势为 $\frac{2W}{q}$，所以电势能为 $E_p=-4W$，故 D 正确。本题的正确答案为 ABD。

考点伸展

5.（2018 年全国理综Ⅱ卷）如图 7-5-2 所示，同一平面内的 a、b、c、d 四点处于匀强电场中，电场方向与此平面平行，M 为 a、c 连线的中点，N 为 b、d 连线的中点。一电荷量为 $q(q>0)$ 的粒子从 a 点移动到 b 点，其电势能减小 W_1；若该粒子从 c 点移动到 d 点，其电势能减小 W_2。下列说法中正确的是（　　）。

A. 此匀强电场的场强方向一定与 a、b 两点连线平行

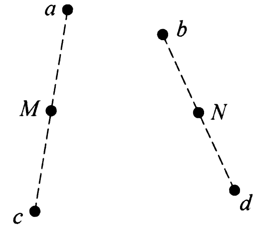


图 7-5-2

B．若该粒子从 M 点移动到 N 点，则电场力做功一定为 $\frac{W_1+W_2}{2}$

C．若 c、d 之间的距离为 L，则该电场的场强大小一定为 $\frac{W_2}{qL}$

D．若 $W_1=W_2$，则 a、M 两点之间的电势差一定等于 b、N 两点之间的电势差

6. 2015 年山东理综卷第 20 题

如图 7－6－1 甲所示，两水平金属板间距为 d，板间电场强度的变化规律如图 7－6－1 乙所示。$t=0$ 时刻，质量为 m 的带电微粒以初速度 v_0 沿中线射入两板间，$0\sim T/3$ 时间内微粒匀速运动，T 时刻微粒恰好经金属板边缘飞出。微粒运动过程中未与金属板接触。重力加速度的大小为 g。下列关于微粒在 $0\sim T$ 时间内运动的描述中，正确的是（　　）。

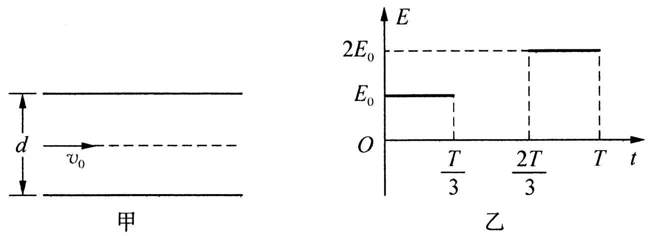


图 7－6－1

A．末速度大小为 $\sqrt{2}v_0$　　　　B．末速度沿水平方向

C．重力势能减少了 $mgd/2$　　　　D．克服电场力做功为 mgd

思路点拨

本题考查学生对带电粒子在电场中的运动规律、受力分析、平抛运动及动能定理的掌握情况。$0\sim T/3$ 时间内微粒匀速运动，重力与电场力平衡，说明带电粒子在运动过程中需要考虑重力的影响。$T/3\sim 2T/3$ 时间内，电场消失，带电粒子在水平方向仍做匀速运动，在竖直方向做匀加速直线运动。$2T/3\sim T$/时间内，需分析粒子运动时沿竖直方向的加速度大小，求得出射速度的竖直分量，从而求得末速度的大小和方向。T 时刻微粒恰好经金属板边缘飞出，说明粒子在整个运动过程中，竖直方向上的位移为 $d/2$，可求得重力做功和电场力做功的大小。

分析解答

因 $0\sim T/3$ 时间内微粒做匀速运动，则 $qE_0=mg$。在 $T/3\sim 2T/3$ 时间内，微粒只受重力作用，做平抛运动，在 $2T/3$ 时刻的竖直分速度为 $v_{y1}=gT/3$，水平分速度为 v_0；在 $2T/3\sim T$ 时间内有 $2qE_0-mg=ma$，得 $a=g$，方向向上，在 T 时刻，微粒的竖直分速度减小到 0，水平分速度仍为 v_0，所以选项 A 错误，B 正确；T 时刻微粒恰好经金属板边缘飞出，分析可知是从下极板的右端飞出，微粒的重力势能减小了 $\Delta E_p=\dfrac{mgd}{2}$，选项 C 正确；从射入到飞出，由动能定理得 $mg\cdot\dfrac{d}{2}+W_电=0$，故克服电场力做功为 $mgd/2$，选项 D 错误。本题答案为 BC。

考点伸展

6.（2015 年安徽模拟题）如图 7－6－2 甲所示，两平行正对的金属板 A、B 间加有如图 7－6－2 乙所示的交变电压，一重力可忽略不计的带正电粒子被固定在两板的正中间 P 处。若在 t_0 时刻释放该粒子，粒子会时而向 A 板运动，时而向 B 板运动，并最终打在 A 板上。则 t_0 可能属于

的时间段是(　　)。

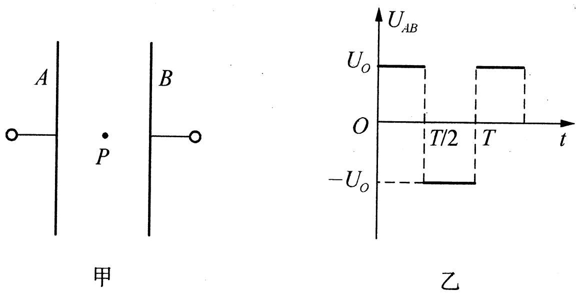


图 7-6-2

A. $0 < t_0 < \frac{T}{4}$

B. $\frac{T}{2} < t_0 < \frac{3T}{4}$

C. $\frac{3T}{4} < t_0 < T$

D. $T < t_0 < \frac{9T}{8}$

7. 2016年10月浙江选考卷第10题

如图7－7－1所示，把一根通电的硬直导线 ab，用轻绳悬挂在通电螺线管正上方，直导线中的电流方向由 a 向 b。闭合开关S瞬间，导线 a 端所受安培力的方向是（　　）。

A．向上

B．向下

C．垂直纸面向外

D．垂直纸面向里

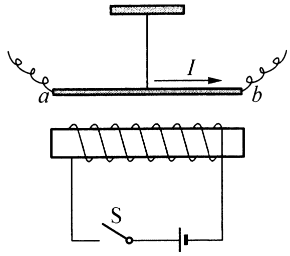


图7－7－1

思路点拨

本题考查通电导线在通电螺线管产生的磁场中受安培力的情形。首先分析通电螺线管在周围空间产生的磁感线的分布情形，确定导线 a 端所在处的磁感线分布，由于 a 端所在处的磁感线与导线 ab 既不平行也不垂直，故需要将 a 端所在处的磁场进行正交分解，其中垂直于导线 ab 的磁场分量对通电导线有安培力的作用，再由左手定则判断 a 端所受安培力的方向。

分析解答

闭合开关S后，回路中的电流方向如图7－7－2所示，由右手定则可判定通电螺线管内外的磁感线分布情形如图7－7－2所示，由图可知，a 端所在处的磁场方向垂直于导线 ab 向下，再由左手定则判定导线 a 端所受安培力的方向垂直纸面向里，选项D正确。

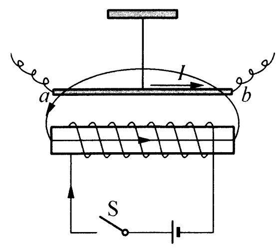


图7－7－2

考点伸展

7.（2017年全国理综Ⅱ卷第21题）某同学自制的简易电动机示意图如图7－7－3所示。矩形线圈由一根漆包线绕制而成，漆包线的两端分别从线圈的一组对边的中间位置引出，并作为线圈的转轴。将线圈架在两个金属支架之间，线圈平面位于竖直面内，永磁铁置于线圈下方。为了使电池与两金属支架连接后线圈能连续转动起来，该同学应将（　　）。

A．左、右转轴下侧的绝缘漆都刮掉

B．左、右转轴上下两侧的绝缘漆都刮掉

C．左转轴上侧的绝缘漆刮掉，右转轴下侧的绝缘漆刮掉

D．左转轴上下两侧的绝缘漆都刮掉，右转轴下侧的绝缘漆刮掉

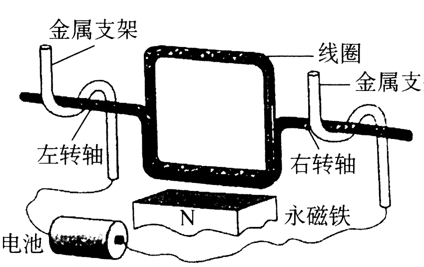


图7－7－3

8. 2019 年全国理综Ⅲ卷第 18 题

如图 7－8－1 所示，在坐标系的第一和第二象限内存在磁感应强度大小分别为$\frac{1}{2}B$和B、方向均垂直于纸面向外的匀强磁场。一质量为m、电荷量为$q(q>0)$的粒子垂直于x轴射入第二象限，随后垂直于y轴进入第一象限，最后经过x轴离开第一象限。粒子在磁场中运动的时间为（　　）。

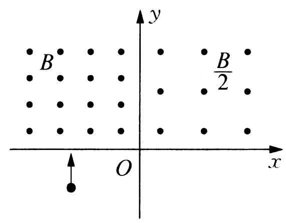


图 7－8－1

A．$\frac{5\pi m}{6qB}$　　B．$\frac{7\pi m}{6qB}$

C．$\frac{11\pi m}{6qB}$　　D．$\frac{13\pi m}{6qB}$

思路点拨

本题考查带电粒子在磁场中的运动规律。带电粒子在匀强磁场做匀速圆周运动，洛伦兹力提供向心力，即$qvB=m\frac{v^2}{R}$，所以有$R=\frac{mv}{qB}$，$T=\frac{2\pi R}{v}=\frac{2\pi m}{qB}$。若粒子射入有界磁场，则其在磁场中运动是一段圆弧，要确定粒子运动的轨迹、圆心、入射点和射点及对应的圆心角。

分析解答

运动轨迹如图 7－8－2。即粒子的运动由两部分组成，第一部分是$\frac{1}{4}$个周期，第二部分是$\frac{1}{6}$个周期，粒子在第二象限运动转过的角度为 90°，则运动的时间为$t_2=\frac{T_2}{4}=\frac{1}{4}\cdot\frac{2\pi m}{qB}=\frac{\pi m}{2qB}$；粒子在第一象限转过的角度为 60°，则运动的时间为$t_1=\frac{T_1}{6}=\frac{1}{6}\cdot\frac{2\pi m}{q\frac{B}{2}}=\frac{2\pi m}{3qB}$；则粒子在磁场中运动的时间为：$t=t_1+t_2=\frac{2\pi m}{3qB}+\frac{\pi m}{2qB}=\frac{7\pi m}{6qB}$，故选项 B 正确，ACD 错误。

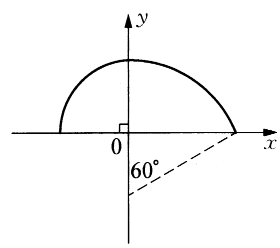


图 7－8－2

考点伸展

8.（2019 年北京理综卷）如图 7－8－3 所示，正方形区域内存在垂直纸面的匀强磁场。一带电粒子垂直磁场边界从a点射入，从b点射出。下列说法中正确的是（　　）。

A．粒子带正电

B．粒子在b点速率大于在a点速率

C．若仅减小磁感应强度，则粒子可能从b点右侧射出

D．若仅减小入射速率，则粒子在磁场中运动时间变短

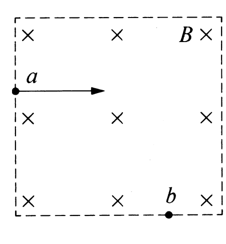


图 7－8－3

9. 2017 年 11 月浙江选考卷第 23 题

如图 7-9-1 所示，x 轴上方存在垂直纸面向外的匀强磁场，坐标原点处有一正离子源，单位时间在 xOy 平面内发射 n_0 个速率为 v 的离子，分布在 y 轴两侧各为 θ 角的范围内。在 x 轴上放置长度为 L 的离子收集板，其右端点距坐标原点的距离为 $2L$，当磁感应强度为 B_0 时，沿 y 轴正方向入射的离子，恰好打在收集板的右端点。整个装置处于真空中，不计重力，不考虑离子间的碰撞，忽略离子间的相互作用。

(1) 求离子的比荷 $\frac{q}{m}$；

(2) 若发射的离子被收集板全部收集，求 θ 的最大值；

(3) 假设离子到达 x 轴时沿 x 轴均匀分布。当 $\theta = 37°$，磁感应强度在 $B_0 \leqslant B \leqslant 3B_0$ 的区间取不同值时，求单位时间内收集板收集到的离子数 n 与磁感应强度 B 之间的关系（不计离子在磁场中运动的时间）。

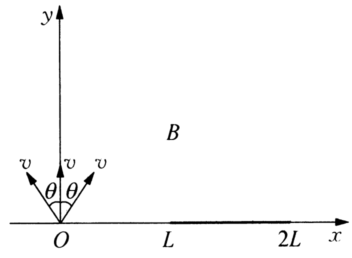


图 7-9-1

思路点拨

本题主要考察带电粒子在匀强磁场中做圆周运动时，偏转半径相同，但入射方向不同的各个粒子，其圆弧轨迹与直线相交的各种情形。要求能通过左手定则判断带电粒子偏转方向，正确地定圆心、画轨迹和求半径，尤其是对题目所要求的临界情况，能画出正确的轨迹图。本题三小题难度逐级增加。第(1)小题临界轨迹为半圆，第(2)小题临界轨迹为弦长相等的优劣弧。第(3)小题要同时考察磁感应强度和入射角的变化，需首先明确某一确切磁感应强度时，离子打到 x 轴上的最近点和最远点分别对应的与 y 轴的夹角（旋转圆模型），然后思考随磁感应强度的变化，最近点和最远点分别如何变化（缩放圆模型）。

(1) 沿 y 轴正方向入射的离子，在磁场中完成半个圆周的运动，打到 $x = 2L$ 处，其偏转半径即为 L。根据洛伦兹力提供向心力，当偏转半径确定时，离子的比荷可求。

(2) 离子入射方向与 y 轴有一定夹角时，属于偏转圆问题。夹角越大，轨迹与 x 轴所交弦越短。临界情况为与 y 轴两侧夹角分别为 θ 入射的离子（轨迹分别为弦长相等的优弧和劣弧）恰好打到收集板的左侧。

(3) 磁感应强度越大，离子偏转半径越小。对确定的偏转半径来说，沿 y 轴正方向入射的离子打到 x 轴上的位置最远，沿与 y 轴夹角最大的速度方向入射的离子打到 x 轴上的位置最近。由于题(3)中所给条件 $\theta = 37°$ 小于题(2)解，说明 $B = B_0$ 时，所有满足该小题条件的离子都能打到收集板上，其中与 y 轴夹角 $\theta = 37°$ 的离子打到板上的点离 $x = L$ 处最近。随着磁感应强度增大，离子偏转半径减小，该点距 $x = L$ 处越来越近。该点恰落到 $x = L$ 处时为临界情况一，此前所有离子都能被收集。继续增大磁感应强度，入射离子中只有部分能被收集。当磁感应强度大到某值时，沿 y 轴正方向入射的离子恰能打到 $x = L$ 处，即最远点恰能到收集板上，此为临界情况二，此后没有任何离子能被收集。

满分解答

(1) 洛伦兹力提供向心力，有 $qvB_0 = m\frac{v^2}{R}$；

圆周运动的半径 $R = L$；

解得 $\frac{q}{m} = \frac{v}{B_0L}$。

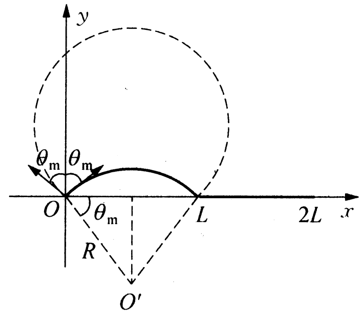


图 7-9-2

(2) 如图 7-9-2 所示，若离子以最大值 θ_m 入射，恰好能打到收集板的左端，则以其他角度入射时均能打到板上，临界情况有

$\Delta x = 2R\cos\theta_m = L$；

解得 $\theta_m = \frac{\pi}{3}$。

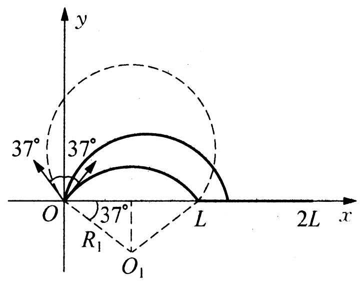


图 7-9-3

(3) $B > B_0$ 时，只要能让 $\theta = 37°$ 入射的离子能打到板上，其他离子均会打到收集板，设全部离子都能被收集时的最小半径为 R_1。

如图 7-9-3 所示，有 $2R_1\cos 37° = L$；

解得 $B_1 = \frac{mv}{qR_1} = 1.6B_0$

即当 $B_0 \leqslant B \leqslant 1.6B_0$ 时，有 $n = n_0$。

$B > 1.6B_0$ 时，设恰好收集不到离子时的半径为 R_2，有 $R_2 = 0.5L$；

解得 $B_2 = 2B_0$。

则当 $1.6B_0 < B \leqslant 2B_0$ 时，设 $R' = \frac{mv}{qB}$，离子以 $\theta = 0°$ 入射打到 x 轴上最远处，$x_{max} = 2R'$；离子以 $\theta = 37°$ 入射时，将打到 x 轴上最近处，$x_{min} = 2R'\cos 37°$，即离子分布在 $2R'\cos 37° \sim 2R'$ 处，则打到收集板上的离子数有 $n = \frac{2R' - L}{2R'(1-\cos 37°)}n_0 = \left(5 - \frac{5B}{2B_0}\right)n_0$

当 $2B_0 < B \leqslant 3B_0$ 时，有 $n = 0$。

考点伸展

9. 若 x 轴上方，在 $-L \leqslant x \leqslant L$ 的范围内存在一圆形匀强磁场，半径为 L，圆心 O 坐标为 $(0, L)$，磁感应强度为 B_0，在直线 $x = L$ 的右侧也存在同样大小的匀强磁场，其余区域无磁场。要收集所有分布在 y 轴两侧各为 θ 角的范围内以速率 v 入射的离子，则 x 轴上收集板的长度应为多长？

10. 2016 年浙江理综卷第 25 题

为了进一步提高回旋加速器的能量，科学家建造了“扇形聚焦回旋加速器”。在扇形聚焦过程中，离子能以不变的速率在闭合平衡轨道上周期性旋转。

扇形聚焦磁场分布的简化图如图 7-10-1 所示，圆心为 O 的圆形区域等分成六个扇形区域，其中三个为峰区，三个为谷区，峰区和谷区相间分布。峰区内存在方向垂直纸面向里的匀强磁场，磁感应强度为 B，谷区内没有磁场。质量为 m，电荷量为 q 的正离子，以不变的速率 v 旋转，其闭合平衡轨道如图中虚线所示。

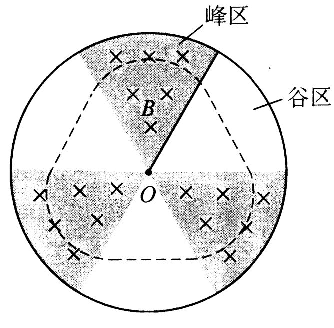


图 7-10-1

(1) 求闭合平衡轨道在峰区内圆弧的半径 r，并判断离子旋转的方向是顺时针还是逆时针；

(2) 求轨道在一个峰区内圆弧的圆心角 θ，及离子绕闭合平衡轨道旋转的周期 T；

(3) 在谷区也施加垂直纸面向里的匀强磁场，磁感应强度为 B'，新的闭合平衡轨道在一个峰区内的圆心角 θ 变为 90°，求 B' 和 B 的关系。

已知：$\sin(\alpha\pm\beta)=\sin\alpha\cos\beta\pm\cos\alpha\sin\beta$，$\cos\alpha=1-2\sin^2\frac{\alpha}{2}$

思路点拨

1. 作出峰区内圆弧的圆心角 θ 是解决问题的关键。如图 7-10-2 所示，离子从 A 点进入峰区，在 C 点离开峰区，直线 BA 和 CD 分别与圆弧上的 A 点和 C 点相切，故过 A 点和 C 点分别作 BA 和 CD 的垂线 AO' 和 CO'，交点 O' 即为圆弧所在圆的圆心，$\angle CO'A$ 即为所求的圆心角 θ，由对称性可知 $\angle CO'E=\frac{\theta}{2}$。由题可知 $\triangle CDO$ 为等边三角形，即 $\angle DCO=60°$，可得 $\angle O'CO=30°$，又由对称性可知 $\angle COO'=\angle AOO'=30°$，由三角形外角等于内角之和即可求得圆心角 θ。

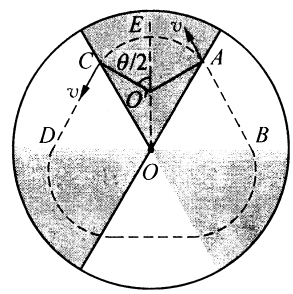


图 7-10-2

2. 欲求离子绕闭合平衡轨道旋转的周期 T，需分别求出离子在峰区和谷区运动的时间。由于离子在峰区运动时圆弧所对的圆心角是 θ，故离子在峰区运动的总时间 $t_1=\frac{3\theta}{2\pi}\cdot\frac{2\pi m}{qB}$；离子在谷区做匀速直线运动，经历的总时间 $t_2=\frac{3\overline{CD}}{v}$，由等腰 $\triangle COO'$（$\angle OCO'=\angle COO'=30°$）的几何关系可得底边 CO 的大小，由于 $\overline{CD}=\overline{CO}$，即可求得 t_2；综上可得 $T=t_1+t_2$。

3. 若在谷区也施加垂直纸面向里的匀强磁场，根据题给条件作出离子新的运动轨迹，找出相应的几何关系，先得到离子在峰区和谷区运动的半径之比，从而得到两区的磁感应强度的关系。如图 7-10-3 所示，过 A、B 两点分别作峰区圆弧的半径，交点 O' 为离子在

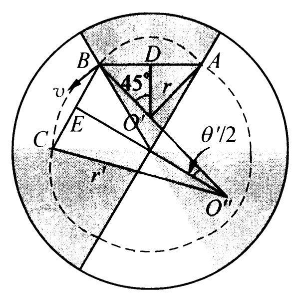


图 7-10-3

峰区圆弧所在圆的圆心；过 B、C 两点分别作谷区圆弧的半径，交点 O'' 为离子在谷区圆弧所在圆的圆心；D 和 E 分别是弦 AB 和 BC 的中点，由于 $\overline{AB}=\overline{BC}$，故 $\overline{DB}=\overline{BE}$，由于 $\triangle BDO'$ 和 $\triangle BEO''$ 均为直角三角形，底边 BO' 和 BO'' 分别等于离子在峰区和谷区运动时的半径 r 和 r'，故有 $r\sin 45^\circ = r'\sin\dfrac{\theta'}{2}$，由图中几何关系可以得到 θ' 的大小，便可求得 r' 和 r 的关系，从而得到 B' 和 B 的关系。

满分解答

解：(1) 离子在峰区内做匀速圆周运动时，洛伦兹力提供向心力，即

$$qvB = m\frac{v^2}{r} \quad ①$$

可得峰区内圆弧的半径

$$r = \frac{mv}{qB} \quad ②$$

由左手定则可判定离子旋转的方向是逆时针方向。

(2) 如图 7-10-4 所示，离子在峰区做圆周运动的圆心在 O' 点，$\angle AO'C$ 即为所求的圆心角 θ。由题可知 $\triangle CDO$ 为等边三角形，即 $\angle DCO=60^\circ$，可得 $\angle O'CO=30^\circ$，又由对称性可知 $\angle COO'=30^\circ$，再由三角形外角等于内角之和，即

$$\frac{\theta}{2} = \angle O'CO + \angle O'OC = 60^\circ \quad ③$$

可得

$$\theta = 120^\circ = \frac{2\pi}{3} \quad ④$$

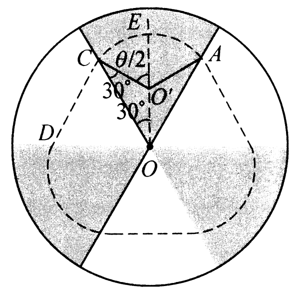


图 7-10-4

离子绕闭合平衡轨道旋转的周期 T 等于离子在峰区和谷区运动的总时间。

离子在峰区运动的总时间

$$t_1 = \frac{3\theta}{2\pi}\cdot\frac{2\pi m}{qB} = \frac{3\theta m}{qB} = \frac{2\pi m}{qB} \quad ⑤$$

离子在谷区做匀速直线运动，经历的总时间

$$t_2 = \frac{3\,\overline{CD}}{v} \quad ⑥$$

由等腰 $\triangle COO'$ 的几何关系可得底边

$$\overline{CO} = 2r\cos 30^\circ = \sqrt{3}\,r \quad ⑦$$

可得

$$t_2 = \frac{3\,\overline{CD}}{v} = \frac{3\,\overline{CO}}{v} = \frac{3\sqrt{3}\,r}{v} = \frac{3\sqrt{3}\,m}{qB} \quad ⑧$$

可得周期

$$T = t_1 + t_2 = \frac{(2\pi + 3\sqrt{3})m}{qB} \quad ⑨$$

(3) 若在谷区也施加垂直纸面向里的匀强磁场，离子的运动轨迹如图 7-10-5 所示。

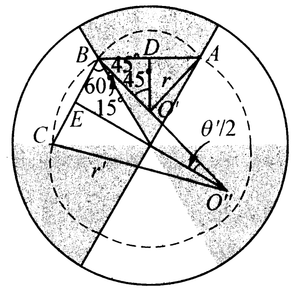


图 7-10-5

图中 O' 和 O'' 分别为离子在峰区和谷区内圆弧所在圆的圆心，D 和 E 分别是弦 AB 和 BC 的中点，由于 $\overline{AB}=\overline{BC}$，故 $\overline{DB}=\overline{BE}$。设离子在峰区和谷区运动时的半径分别为 r 和 r'，则有

$$r\sin 45^\circ = r'\sin\frac{\theta'}{2} \qquad ⑩$$

由几何关系可得图中各角的大小，如图所示，可知等腰 $\triangle BCO'$ 的底角

$$\angle O'BC = 15^\circ + 60^\circ = 75^\circ \qquad ⑪$$

故等腰 $\triangle BCO'$ 的半顶角

$$\frac{\theta'}{2} = 15^\circ \qquad ⑫$$

由三角函数知识可得

$$\sin 15^\circ = \frac{\sqrt{6}-\sqrt{2}}{4} \qquad ⑬$$

代入可得

$$\frac{r}{r'} = \frac{\frac{\sqrt{6}-\sqrt{2}}{4}}{\frac{\sqrt{2}}{2}} = \frac{\sqrt{3}-1}{2} \qquad ⑭$$

由离子在匀强磁场中做圆周运动的半径 $r=\frac{mv}{qB}$，又由于洛伦兹力不做功，即离子在峰区与谷区运动时速率 v 保持不变，可见 $B \propto \frac{1}{r}$，可得

$$\frac{B'}{B} = \frac{r}{r'} = \frac{\sqrt{3}-1}{2} \qquad ⑮$$

即

$$B' = \frac{\sqrt{3}-1}{2}B \qquad ⑯$$

考点伸展

10. (1) 求原题第(3)问中新的闭合平衡轨道旋转的周期 T'；

(2) 若将原题中的圆形区域等分成 $2n$ 个扇形区域，其中 n 个为峰区，n 个为谷区，峰区和谷区相间分布。离子以不变的速率 v 绕闭合平衡轨道旋转，试定量分析离子在峰区和谷区运动的总时间 T_1 和 T_2 是否与 n 有关，若有关请写出关系式。

11. 2018年江苏物理卷第23题

如图7-11-1所示,真空中四个相同的矩形匀强磁场区域,高为 $4d$,宽为 d,中间两个磁场区域间隔为 $2d$,中轴线与磁场区域两侧相交于 O、O' 点,各区域磁感应强度大小相等。某粒子质量为 m、电荷量为 $+q$,从 O 沿轴线射入磁场。当入射速度为 v_0 时,粒子从 O 上方 $d/2$ 处射出磁场。取 $\sin 53° = 0.8$,$\cos 53° = 0.6$。

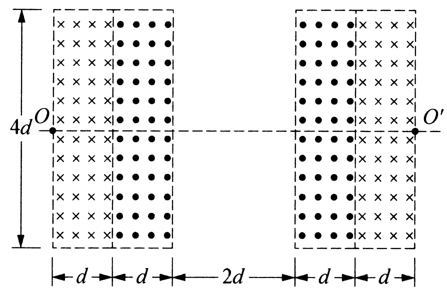


图 7-11-1

(1) 求磁感应强度大小 B;

(2) 入射速度为 $5v_0$ 时,求粒子从 O 运动到 O' 的时间 t;

(3) 入射速度仍为 $5v_0$,通过沿轴线 OO' 平移中间两个磁场(磁场不重叠),可使粒子从 O 运动到 O' 的时间增加 Δt,求 Δt 的最大值。

思路点拨

1. 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动时由洛伦兹力提供向心力,当粒子垂直直线边界射入匀强磁场时,亦会垂直同一边界射出磁场。

2. 改变粒子的入射速度会改变粒子在磁场中偏转轨迹的半径,根据粒子射入、射出磁场时所受洛伦兹力的方向确定圆心,再由对称性画出粒子从 O 到 O' 的轨迹图。利用几何关系算出粒子运动轨迹对应的圆心角,进而得到在磁场中偏转运动的时间。粒子在无磁场区域做的是匀速直线运动,最后把两部分时间相加即为所求时间;

3. 在前一问的基础上,当中间的磁场沿轴线 OO' 平移时,粒子会沿斜线射出磁场做匀速直线运动,路程将比水平直线运动的长。中间的两个磁场在正中心位置对接在一起时,粒子在磁场中路程增加得最多,但此时粒子可能会冲出磁场的上边界。所以在保证粒子能运动到 O' 点的前提下,粒子运动到矩形磁场的上边界处离开磁场再做一段匀速直线运动,再进入磁场偏转对称地回到 O' 点,此时的运动路程增加最大,增加的时间最长。

满分解答

(1) 根据洛伦兹力提供向心力,有 $qv_0B = \frac{mv_0^2}{r_0}$,得粒子做圆周运动的半径 $r_0 = \frac{mv_0}{qB}$,由题意知 $r_0 = \frac{d}{4}$,解得 $B = \frac{4mv_0}{qd}$。

(2) 粒子入射速度为 $5v_0$ 时,其偏转轨道半径 $r = \frac{5}{4}d$,设粒子在矩形磁场中的偏转角为 α,由 $d = r\sin\alpha$,得 $\sin\alpha = 0.8$,即 $\alpha = 53°$。粒子从 O 到 O' 的运动轨迹如图7-11-2所示。

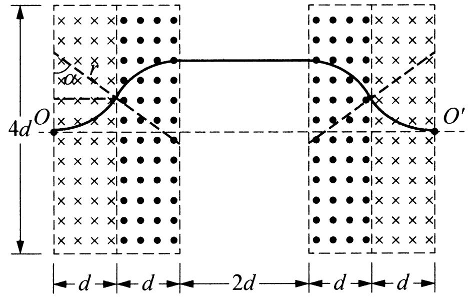


图 7-11-2

在一个矩形磁场中的运动时间 $t_1=\frac{\alpha}{360°}\cdot\frac{2\pi m}{qB}$，解得 $t_1=\frac{53\pi d}{720v_0}$。粒子做直线运动的时间 $t_2=\frac{2d}{v}$，解得 $t_2=\frac{2d}{5v_0}$。则粒子从 O 运动到 O' 的时间 $t=4t_1+t_2=\frac{(53\pi+72)d}{180v_0}$。

(3) 将中间两磁场分别向中央移动距离 x，粒子向上的偏移量 $y=2r(1-\cos\alpha)+x\tan\alpha$。

由 $y\leqslant 2d$，解得 $x\leqslant\frac{3}{4}d$。则当 $x_m=\frac{3}{4}d$ 时，Δt 有最大值，粒子运动轨迹如图 7－11－3 所示。粒子直线运动路程的最大值包括两部分，两段斜直线 $x_1=\frac{2x_m}{\cos\alpha}$；另一段水平直线在中间两个磁场之间的距离 $x_2=2d-2x_m$。因此粒子直线运动路程的最大值

$s_m=x_1+x_2=\frac{2x_m}{\cos\alpha}+(2d-2x_m)=3d$，增加路程的最大值 $\Delta s_m=s_m-2d=d$，增加时间的最大值 $\Delta t_m=\frac{\Delta s_m}{v}=\frac{d}{5v_0}$。

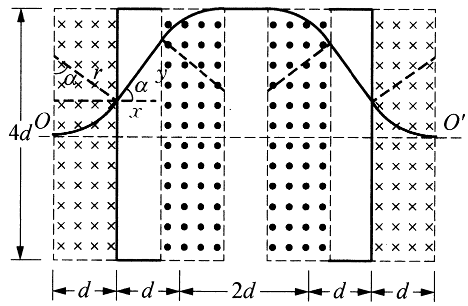


图 7－11－3

考点伸展

11. 其他条件均不变，只将四个矩形磁场的高度设置为无限长，仍然求算上述第(3)问。

12. 2018 年 11 月浙江选考卷第 23 题

小明受回旋加速器的启发，设计了如图 7-12-1 所示的“回旋变速装置”。两相距为 d 的平行金属栅极板 M、N，板 M 位于 x 轴上，板 N 在它的正下方。两板间加上如图 7-12-2 所示的幅值为 U_0 的交变电压，周期 $T_0=\frac{2\pi m}{qB}$。板 M 上方和板 N 下方有磁感应强度大小均为 B、方向相反的匀强磁场。粒子探测器位于 y 轴处，仅能探测到垂直射入的带电粒子。

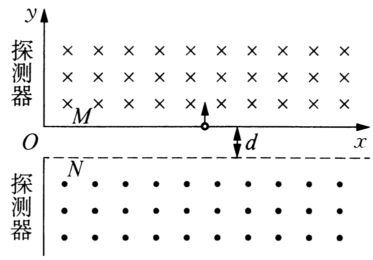


图 7-12-1

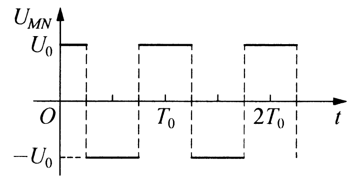


图 7-12-2

有一沿 x 轴可移动、粒子出射初动能可调节的粒子发射源，沿 y 轴正方向射出质量为 m、电荷量为 $q(q>0)$ 的粒子。$t=0$ 时刻，发射源在 $(x,\ 0)$ 位置发射一带电粒子。忽略粒子的重力和其他阻力，粒子在电场中运动的时间不计。

(1) 若粒子只经磁场偏转并在 $y=y_0$ 处被探测到，求发射源的位置和粒子的初动能；

(2) 若粒子两次进出电场区域后被探测到，求粒子发射源的位置 x 与被探测到的位置 y 之间的关系。

思路点拨

1. 粒子垂直于 x 轴方向射入匀强磁场，垂直于 y 轴方向被探测到，故粒子在磁场中转过了 90°，即运动了 $\frac{1}{4}$ 个周期，粒子做圆周运动的圆心位于坐标原点。

2. 先分析粒子第一次进出电场区域的情形。粒子在磁场中运动半个周期 $\frac{T_0}{2}=\frac{\pi m}{qB}$ 后进入电场区域，此时 $U_{MN}=-U_0$，故粒子第一次进入电场区域时是被减速的，这里有两种情况：

(1) 若粒子的初动能 $E_{k0}>qU_0$，则粒子能从电场区域的另一侧射出，在板 N 下方的匀强磁场区域中运动半个周期后第二次进入电场区域，此时 $U_{MN}=U_0$，粒子仍将被减速，这里又有两种情况：(i) 若粒子的动能 $E_{k1}=E_{k0}-qU_0>qU_0$，即 $E_{k0}>2qU_0$，粒子还能从电场区域的另一侧射出后回到板 M 上方的磁场区域，在磁场中运动 $\frac{1}{4}$ 个周期后在 y 轴正半轴上被探测到，该情形粒子的运动轨迹如图 7-12-3 所示；(ii) 若粒子的动能 $E_{k1}=E_{k0}-qU_0<qU_0$，即 $qU_0<E_{k0}<2qU_0$，粒子第二次进入电场区域后先做减速运动，速度减到 0 时还没有离开电场区域，接着反方向做加速运动仍回到板 N 下方磁场区域，在磁场中运动 $\frac{1}{4}$ 个周期后在 y 轴负半轴上被探测到，该情形

粒子的运动轨迹如图 7－12－4 所示；

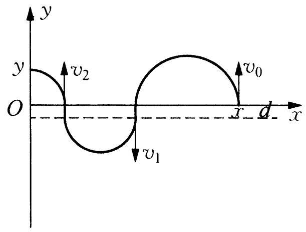


图 7－12－3

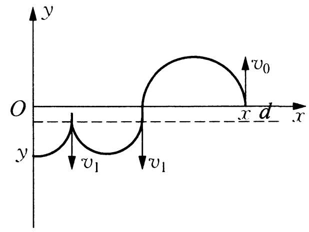


图 7－12－4

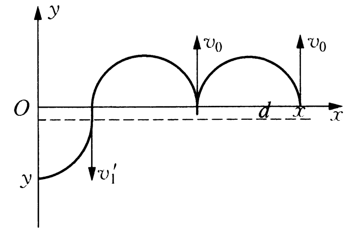


图 7－12－5

(2) 若粒子的初动能 $E_{k0} < qU_0$，则粒子第一次进入电场区域后先做减速运动，速度减到 0 时还没有离开电场区域，接着粒子反方向做加速运动仍回到板 M 上方磁场区域，在磁场中运动半个周期后粒子第二次进入电场区域是被加速的，离开电场区域后粒子进入 N 板下方磁场区域，在磁场中运动$\frac{1}{4}$个周期后在 y 轴负半轴上被探测到，该情形粒子的运动轨迹如图 7－12－5 所示；

综上分析，粒子的运动情形视粒子的初动能值的不同而分 $E_{k0} > 2qU_0$、$qU_0 < E_{k0} < 2qU_0$、$E_{k0} < qU_0$ 三种情况讨论。

3. 本题在求解的时候还需注意一个细节，即粒子在 y 轴负半轴上被探测到时，粒子的坐标为(0, y)，但粒子在板 N 下方的磁场中做圆周运动的半径是 $(-y-d)$，因为板 M、N 的间距为 d。

分析解答

解：(1) 由于粒子只经磁场偏转后垂直于 y 轴方向在 $y = y_0$ 处被探测到，故粒子做圆周运动的半径为

$$R = y_0 \qquad ①$$

即粒子发射源的位置

$$x = R，故\ x = y_0 \qquad ②$$

由

$$R = y_0 = \frac{mv_0}{qB},\ E_{k0} = \frac{1}{2}mv_0^2 \qquad ③$$

可得粒子的初动能

$$E_{k0} = \frac{q^2B^2y_0^2}{2m} \qquad ④$$

(2) 若粒子两次进出电场区域后被探测到，需分三种情况讨论：

(i) 粒子的初动能 $E_{k0} > 2qU_0$ 时，粒子的运动轨迹如图 7－12－3 所示。

粒子被探测到的位置为(0, y)

$$y = \frac{mv_2}{qB}，即\ v_2 = \frac{qBy}{m} \qquad ⑤$$

对粒子经电场第二次减速过程研究，由动能定理可列式

$$-qU_0=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2 \quad ⑥$$

可得粒子经电场第一次减速后的速度

$$v_1=\sqrt{v_2^2+\frac{2qU_0}{m}}=\sqrt{\left(\frac{qBy}{m}\right)^2+\frac{2qU_0}{m}} \quad ⑦$$

故粒子经电场第一次减速后在磁场中做圆周运动的半径

$$R_1=\frac{mv_1}{qB}=\frac{1}{qB}\sqrt{(qBy)^2+2mqU_0} \quad ⑧$$

对粒子经电场第一次减速过程研究，由动能定理可列式

$$-qU_0=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_0^2 \quad ⑨$$

可得粒子的初速度

$$v_0=\sqrt{v_1^2+\frac{2qU_0}{m}}=\sqrt{\left(\frac{qBy}{m}\right)^2+\frac{4qU_0}{m}} \quad ⑩$$

故粒子射出后在磁场中做圆周运动的半径

$$R_0=\frac{mv_0}{qB}=\frac{1}{qB}\sqrt{(qBy)^2+4mqU_0} \quad ⑪$$

因此粒子发射源的位置为$(x_1,\ 0)$

$$x_1=y+2R_1+2R_0=y+\frac{2}{qB}\left(\sqrt{(qBy)^2+2mqU_0}+\sqrt{(qBy)^2+4mqU_0}\right) \quad ⑫$$

(ii) 粒子的初动能 $qU_0<E_{k0}<2qU_0$ 时，粒子的运动轨迹如图 7-12-4 所示。

粒子被探测到的位置在 y 轴的负半轴上，粒子在被探测到之前做圆周运动的半径为 $(-y-d)$，故有

$$-y-d=\frac{mv_1}{qB}，即\ v_1=\frac{qB(-y-d)}{m} \quad ⑬$$

粒子第二次进出电场区域过程，静电力对粒子不做功，粒子的速度大小不变，方向相反，对粒子经电场第一次减速过程研究，由动能定理可列式

$$-qU_0=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_0^2 \quad ⑭$$

可得粒子的初速度

$$v_0=\sqrt{v_1^2+\frac{2qU_0}{m}}=\sqrt{\left[\frac{qB(y+d)}{m}\right]^2+\frac{2qU_0}{m}} \quad ⑮$$

故粒子射出后在磁场中做圆周运动的半径

$$R_0=\frac{mv_0}{qB}=\frac{1}{qB}\sqrt{[qB(y+d)]^2+2mqU_0} \quad ⑯$$

因此粒子发射源的位置为(x_2，0)

$$x_2=3\times(-y-d)+2R_0=-3(y+d)+\frac{2}{qB}\sqrt{[qB(y+d)]^2+2mqU_0} \tag{17}$$

(iii) 粒子的初动能 $E_{k0}<qU_0$ 时，粒子的运动轨迹如图 7-12-5 所示。

粒子被探测到的位置在 y 轴的负半轴上，粒子在被探测到之前做圆周运动的半径为 $(-y-d)$，故有

$$-y-d=\frac{mv_1'}{qB}\text{，即 } v_1'=\frac{qB(-y-d)}{m} \tag{18}$$

粒子第二次进出电场区域是被电场加速的，故对粒子经电场加速过程研究，由动能定理可列式

$$qU_0=\frac{1}{2}mv_1'^2-\frac{1}{2}mv_0^2 \tag{19}$$

可得粒子速度

$$v_0=\sqrt{v_1'^2-\frac{2qU_0}{m}}=\sqrt{\left[\frac{qB(y+d)}{m}\right]^2-\frac{2qU_0}{m}} \tag{20}$$

故粒子第一次进出电场区域后在磁场中做圆周运动的半径

$$R_0=\frac{mv_0}{qB}=\frac{1}{qB}\sqrt{[qB(y+d)]^2-2mqU_0} \tag{21}$$

粒子第一次进出电场区域过程，静电力对粒子不做功，粒子的速度大小不变，方向相反，故粒子射出后在磁场中做圆周运动的半径也为 R_0，因此粒子发射源的位置为(x_3，0)

$$x_3=(-y-d)+4R_0=-(y+d)+\frac{4}{qB}\sqrt{[qB(y+d)]^2-2mqU_0} \tag{22}$$

考点伸展

12. 如原题所述，若是 $t=\frac{T_0}{2}$ 时刻，发射源在(x，0)位置发射一带电粒子，粒子两次进出电场区域后被探测到，求粒子发射源的位置 x 与被探测到的位置 y 之间的关系。

13. 2019 年 4 月浙江选考卷第 23 题

有一种质谱仪由静电分析器和磁分析器组成，其简化原理如图 7-13-1 所示。左侧静电分析器中有方向指向圆心 O、与 O 点等距离各点的场强大小相同的径向电场，右侧的磁分析器中分布着方向垂直于纸面向外的匀强磁场，其左边界与静电分析器的右边界平行，两者间距近似为零。离子源发出两种速度均为 v_0、电荷量均为 q、质量分别为 m 和 $0.5m$ 的正离子束，从 M 点垂直该点电场方向进入静电分析器。在静电分析器中，质量为 m 的离子沿半径为 r_0 的四分之一圆弧轨道做匀速圆周运动，从 N 点水平射出，而质量为 $0.5m$ 的离子恰好从 ON 连线的中点 P 与水平方向成 θ 角射出，从静电分析器射出的这两束离子垂直磁场方向射入磁分析器中，最后打在放置于磁分析器左边界的探测板上，其中质量为 m 的离子打在 O 点正下方的 Q 点。已知 $OP=0.5r_0$，$OQ=r_0$，N、P 两点间的电势差 $U_{NP}=\dfrac{mv_0^2}{q}$，$\cos\theta=\sqrt{\dfrac{4}{5}}$，不计重力和离子间相互作用。

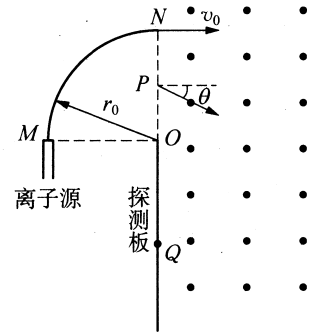


图 7-13-1

（1）求静电分析器中半径为 r_0 处的电场强度 E_0 和磁分析器中的磁感应强度 B 的大小；

（2）求质量为 $0.5m$ 的离子到达探测板上的位置与 O 点的距离 l（用 r_0 表示）；

（3）若磁感应强度在 $(B-\Delta B)$ 到 $(B+\Delta B)$ 之间波动，要在探测板上完全分辨出质量为 m 和 $0.5m$ 的两束离子，求 $\dfrac{\Delta B}{B}$ 的最大值。

思路点拨

1. 带电粒子在电场中做匀速圆周运动时，静电力提供向心力，有 $qE=m\dfrac{v^2}{r}$。

2. 带电粒子在磁场中做匀速圆周运动时，洛伦兹力提供向心力，有 $qvB=m\dfrac{v^2}{r}$。

3. 带电粒子在电场中运动时，静电力做功，粒子的动能发生改变，有 $qU=\dfrac{1}{2}mv^2-\dfrac{1}{2}mv_0^2$。

4. 根据圆的半径和圆的弦长的关系，可得粒子在探测板上的落点。

5. 磁场的磁感应强度波动导致圆的半径波动，为在探测板上完全分辨出两束粒子的落点，应该找到两束粒子打到探测板上范围刚好有重合的临界条件。

满分解答

解：（1）离子在电场中运动，所受径向电场力提供向心力，有 $E_0q=m\dfrac{v_0^2}{r_0}$，得 $E_0=\dfrac{mv_0^2}{qr_0}$。

离子在磁场中运动时，所受洛伦兹力提供向心力，有 $qv_0B=m\dfrac{v_0^2}{r_0}$，得 $B=\dfrac{mv_0}{qr_0}$。

(2) 质量为 0.5m 的离子在电场中运动时，由动能定理，有 $qU_{NP}=\frac{1}{2}\times0.5mv^2-\frac{1}{2}\times0.5mv_0^2$，得 $v=\sqrt{5}v_0$。该离子在磁场中运动时的轨道半径 $r=\frac{0.5mv}{qB}=\frac{\sqrt{5}}{2}r_0$，该离子到达探测板上的位置与 N 点距离为 $2r\cos\theta=2r_0$。则质量为 0.5m 的离子到达探测板上的位置与 O 点距离为 $l=2r_0-0.5r_0=1.5r_0$。

(3) 由第(2)问可知：质量为 0.5m 的离子到达探测板上的位置要比质量为 m 的离子位置更靠下，在磁感应强度波动时，两者到达探测板的位置也会上下波动。为在探测板上完全分开两束离子，当质量为 0.5m 的离子到达探测板上的最高位置与质量为 m 的离子的最低位置重合时，此时 $\frac{\Delta B}{B}$ 达到最大。则 N 点与质量为 0.5m 的离子到达探测板上的最高位置间的距离为 $2\frac{mv_0}{q(B+\Delta B)}+0.5r_0$。

N 点与质量为 m 的离子的最低位置间的距离为 $2\frac{mv_0}{q(B-\Delta B)}$；两者相等，即 $2\frac{mv_0}{q(B+\Delta B)}+0.5r_0=2\frac{mv_0}{q(B-\Delta B)}$，将 $r_0=\frac{mv_0}{qB}$ 代入上式，得 $\frac{\Delta B}{B}=\sqrt{17}-4\approx12\%$。

考点伸展

13. 原题中若磁感应强度在 $(B-0.2B)$ 到 $(B+0.2B)$ 之间波动，两束离子在探测板上重合的长度有多长？

14. 2019 年江苏物理卷第 16 题

如图 7－14－1 所示，匀强磁场的磁感应强度大小为 B。磁场中的水平绝缘薄板与磁场的左、右边界分别垂直相交于 M、N，$MN = L$，粒子打到板上时会被反弹（碰撞时间极短），反弹前后水平分速度不变，竖直分速度大小不变、方向相反。质量为 m、电荷量为 $-q$ 的粒子速度一定，可以从左边界的不同位置水平射入磁场，在磁场中做圆周运动的半径为 d，且 $d < L$，粒子重力不计，电荷量保持不变。

(1) 求粒子运动速度的大小 v；

(2) 欲使粒子从磁场右边界射出，求入射点到 M 的最大距离 d_m；

(3) 从 P 点射入的粒子最终从 Q 点射出磁场，$PM = d$，$QN = \frac{d}{2}$，求粒子从 P 到 Q 的运动时间 t。

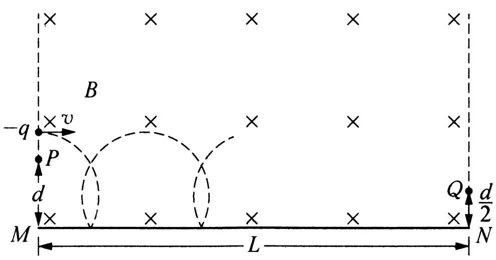


图 7－14－1

思路点拨

本题的核心考点涉及带电粒子在有界磁场中运动的问题，对于这一类问题，一般的解题思路是根据题设条件画出粒子运动的轨迹，结合几何关系即可解决问题。

1. 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动，洛伦兹力提供向心力。由题设中给出的半径 d，根据半径公式，即可求得粒子的运动速度大小。

2. 粒子从左边界的某处垂直射入磁场，由于粒子的运动半径一定，入射点到 M 的距离（大于 d 且小于 $2d$）越大，则粒子与水平薄板第一次碰撞点就会离 M 点越近，粒子从左边界射出的可能性就越大。要使粒子从右边界射出，且入射点到 M 的距离最大，则粒子第一次碰撞后的运动轨迹恰好与左边界相切，由几何关系可求得最大距离。

3. 粒子从左边界距 M 点为半径 d 处垂直射入磁场，则粒子除第一次经过 $\frac{1}{4}$ 圆周垂直地撞向水平薄板之外（因 $d < L$，第一次碰撞必会发生），此后若还会发生碰撞的话，则每次均经 $\frac{1}{2}$ 圆周垂直地撞向水平薄板。要使粒子最终从距 N 点为 $\frac{d}{2}$ 的 Q 点射出，画出运动轨迹与右边界的交点，在同一个半圆弧上有两种可能，由几可关系可知，所对的圆心角分别为 30° 或 150°，则粒子最后一次碰撞到射出磁场的时间为 $\frac{T}{12}$ 或 $\frac{5T}{12}$。由特殊到一般的思维方式可推出运动时间的多解性。

满分解答

解:(1) 粒子在磁场中做匀速圆周运动,由洛伦兹力提供向心力,有

$$qvB = m\frac{v^2}{R} \quad ①$$

解得 $$R = \frac{mv}{qB} \quad ②$$

由题可知 $$R = d \quad ③$$

解得 $$v = \frac{qBd}{m} \quad ④$$

(2) 欲使粒子从磁场右边界射出,如图 7-14-2 所示,粒子第一次碰撞后的运动轨迹恰好与磁场左边界相切,由几何关系得

$$d_m = d(1 + \sin 60°) \quad ⑤$$

解得 $$d_m = \frac{2+\sqrt{3}}{2}d \quad ⑥$$

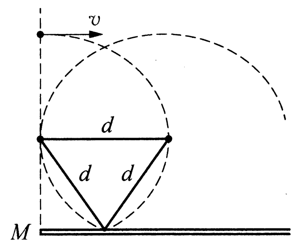


图 7-14-2

(3) 粒子的运动周期 $T = \frac{2\pi m}{qB}$。 ⑦

由图 7-14-3 可知,设粒子最后一次碰撞到射出磁场的时间为 t',粒子从 P 到 Q 的运动时间

$$t = n\frac{T}{4} + t'(n = 1, 3, 5, \cdots) \quad ⑧$$

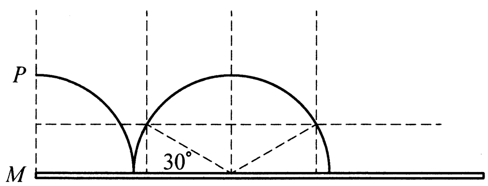


图 7-14-3

(Ⅰ) 当 $L = nd + \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right)d$ 时,粒子斜向上射出磁场

$$n = \frac{L}{d} + \frac{\sqrt{3}}{2} - 1,\ t' = \frac{1}{12}T \quad ⑨$$

解得 $$t = \left(\frac{L}{d} + \frac{3\sqrt{3}-4}{6}\right)\frac{\pi m}{2qB} \quad ⑩$$

(Ⅱ) 当 $L = nd + \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)d$ 时,粒子斜向下射出磁场

$$n = \frac{L}{d} - \frac{\sqrt{3}}{2} - 1,\ t' = \frac{5}{12}T \quad ⑪$$

解得 $$t = \left(\frac{L}{d} - \frac{3\sqrt{3}-4}{6}\right)\frac{\pi m}{2qB} \quad ⑫$$

考点伸展

14. 原题中,带电粒子从左边界上的 E 点水平射入磁场,且 $EM = \frac{d}{2}$,最终垂直射出右边界,求粒子在磁场中的运动时间 t。

15. 2017 年江苏物理卷第 23 题

一台质谱仪的工作原理如图 7－15－1 所示。大量的甲、乙两种离子飘入电压为 U_0 的加速电场，其初速度几乎为 0，经过加速后，通过宽为 L 的狭缝 MN 沿着与磁场垂直的方向进入磁感应强度为 B 的匀强磁场中，最后打到照相底片上。已知甲、乙两种离子的电荷量均为 $+q$，质量分别为 $2m$ 和 m，图中虚线为经过狭缝左、右边界 M、N 的甲种离子的运动轨迹。不考虑离子间的相互作用。

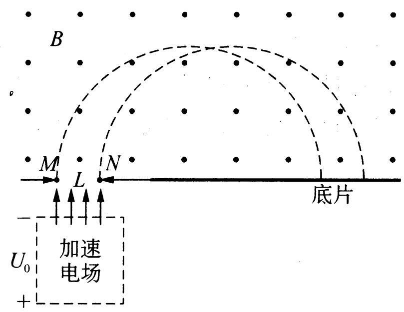


图 7－15－1

(1) 求甲种离子打在底片上的位置到 N 点的最小距离 x；

(2) 用斜线标出磁场中甲种离子经过的区域，并求该区域最窄处的宽度 d；

(3) 若考虑加速电压有波动，在 $(U_0-\Delta U)$ 到 $(U_0+\Delta U)$ 之间变化，要使甲、乙两种离子打在底片上的区域没有重叠，求狭缝宽度 L 满足的条件。

思路点拨

考查动能定理与牛顿第二定律的应用，确定运动半径与电压的关系，这是解题的关键之处，同时注意理解：甲、乙两种离子打在照相底片上的区域不重叠的含义。

1. 从 M 进入磁场的粒子打在底片上的位置到 N 点距离最小，由动能定理求出粒子进入磁场的速度，根据洛伦兹力提供向心力求出轨道半径，由几何关系即可求解甲种离子打在底片上的位置到 N 点的最小距离 x。

2. 就是将一个虚线半圆平移到另一个虚线半圆，最窄处位于过两虚线交点的垂线上，把两个虚线圆心找到，并连接两圆的最高点，两个圆的最高点之间的距离为 L，根据几何关系求解。

3. 要使甲、乙两种离子打在底片上的区域没有重叠，则要求从 M 点射进磁场的最慢甲种离子到底片的距离比从 N 点射入的最快的乙种离子到达底片的距离要大 L，即两轨迹的直径相差为 L，然后根据几何关系求解即可。

满分解答

解：(1) 设甲种离子经电场加速后速度为 v，则

$$qU_0=\frac{1}{2}\times 2mv^2 \quad ①$$

若离子在磁场中的运动半径为 r_1，根据牛顿第二定律可得

$$qvB=2m\frac{v^2}{r_1} \quad ②$$

解得

$$r_1=\frac{2}{B}\sqrt{\frac{mU_0}{q}} \quad ③$$

根据几何关系 $x=2r_1-L$，解得

$$x=\frac{4}{B}\sqrt{\frac{mU_0}{q}}-L \quad ④$$

（2）如图 7-15-2 所示，离子在进入磁场之后的运动轨迹是一个半圆，离子入射点的位置从 M 点过渡到 N 点，轨迹半圆向右平移，则最窄处位于图中过两虚线交点的垂线上，图 7-15-3 中 C、D 之间的距离就是所求最窄处的宽度。由几何关系可知

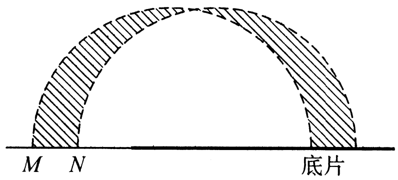


图 7-15-2

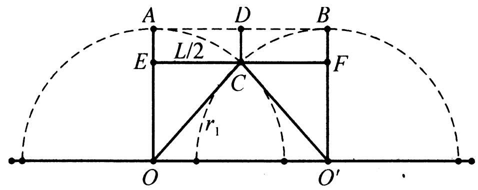


图 7-15-3

$$d=r_1-\sqrt{r_1^2-\left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad ⑤$$

解得

$$d=\frac{2}{B}\sqrt{\frac{mU_0}{q}}-\sqrt{\frac{4mU_0}{qB^2}-\frac{L^2}{4}} \quad ⑥$$

（3）设乙种离子在磁场中的运动半径为 r_2，由③式可得，r_1 的最小半径

$$r_{1\min}=\frac{2}{B}\sqrt{\frac{m(U_0-\Delta U)}{q}} \quad ⑦$$

r_2 的最大半径

$$r_{2\max}=\frac{1}{B}\sqrt{\frac{2m(U_0+\Delta U)}{q}} \quad ⑧$$

由题意知 $2r_{1\min}-2r_{2\max}>L$，即

$$\frac{4}{B}\sqrt{\frac{m(U_0-\Delta U)}{q}}-\frac{2}{B}\sqrt{\frac{2m(U_0+\Delta U)}{q}}>L \quad ⑨$$

解得

$$L<\frac{2}{B}\sqrt{\frac{m}{q}}\left[2\sqrt{(U_0-\Delta U)}-\sqrt{2(U_0+\Delta U)}\right] \quad ⑩$$

考点伸展

15. 如图 7-15-4 所示，若加速电场为匀强电场，其长度为 D，则某一时刻甲、乙两种离子同时进入电场，在 $(U_0-\Delta U)$ 到 $(U_0+\Delta U)$ 之间变化时，则甲、乙两种离子到达底片的最短时间和最长时间分别是多少？

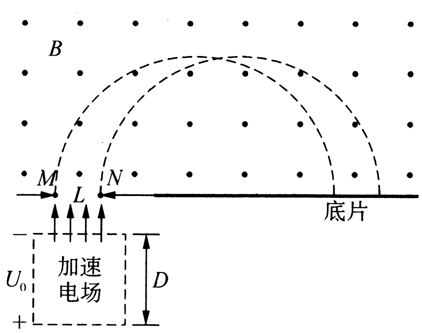


图 7-15-4

16. 2018 年全国理综Ⅱ卷第 12 题

一足够长的条状区域内存在匀强电场和匀强磁场，其在 xOy 平面内的截面如图 7－16－1 所示：中间是磁场区域，其边界与 y 轴垂直，宽度为 l，磁感应强度的大小为 B，方向垂直于 xOy 平面；磁场的上、下两侧为电场区域，宽度均为 l'，电场强度的大小均为 E，方向均沿 x 轴正方向；M、N 为条形区域边界上的两点，它们的连线与 y 轴平行。一带正电的粒子以某一速度从 M 点沿 y 轴正方向射入电场，经过一段时间后恰好以从 M 点入射的速度从 N 点沿 y 轴正方向射出。不计重力。

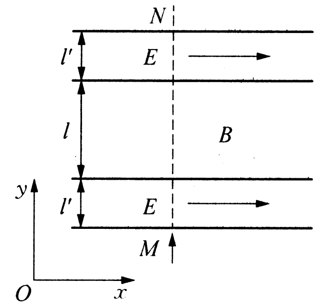


图 7－16－1

(1) 定性画出该粒子在电磁场中运动的轨迹；

(2) 求该粒子从 M 点射入时速度的大小；

(3) 若该粒子进入磁场时的速度方向恰好与 x 轴正方向的夹角为 $\frac{\pi}{6}$，求该粒子的比荷及其从 M 点运动到 N 点的时间。

思路点拨

本题属于带电粒子在组合场中的运动问题，带电粒子在电场中做类平抛运动和在磁场中做匀速圆周运动是两种典型的曲线运动；考查了用运动合成和分解来处理类平抛运动的基本研究方法和圆周运动向心力公式、周期公式。处理带电粒子在组合场中的运动问题，画好粒子运动的轨迹是解决这类问题的关键，本题把定性画出轨迹作为第一小题，强调了画好轨迹的重要性。本题的场在空间上并不重合，而是粒子先后在电场磁场电场中交替运动，带电粒子垂直进入下方电场，匀强电场施加的恒力与初速度垂直，满足类平抛运动的初始条件，画类平抛运动轨迹应先确定入射点和出射点以及类水平位移的中点，要注意画出出射速度方向反向延长线交类水平位移中点这一特征；进入磁场后确定圆心是画好磁场中运动轨迹的关键点，圆心的确定通常要利用洛伦兹力作用线、弦的中垂线、角平分线这三类线相交；本题由于轨迹关于 MN 中垂线对称，所以圆心必落在此中垂线上。从本题的解答过程我们不难发现，条形区域的作用相当于速度选择器，只有速度满足一定条件的粒子能从 N 点垂直边界出射，而与粒子的比荷和电性无关。

满分解答

解：(1) 粒子在上下两侧电场中做类平抛运动和类斜抛运动的轨迹均为抛物线，在磁场中为部分圆周运动轨迹为圆弧，圆心在 MN 中垂线上，并关于中垂线上下对称。粒子运动轨迹如图 7－16－2 所示。

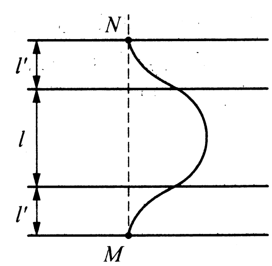


图 7－16－2

(2) 粒子从电场下边界入射后在电场中做类平抛运动。设粒子质量和电荷量分别为 m、q，从 M 点射入时速度的大小为 v_0，在下侧电场中运动的时间为 t，加速度的大小为 a；粒子进入磁场的速度大小为 v，方向与电场方向的夹角为 θ，速度沿电场方向的分量为 v_1、合速度为 v，如图 7－16－3 所示，根据牛顿第二定律有

$$qE = ma \quad ①$$

由运动学公式有

$$v_1 = at \quad ②$$

$$l' = v_0 t \quad ③$$

$$\cos\theta = \frac{v_1}{v} \quad ④$$

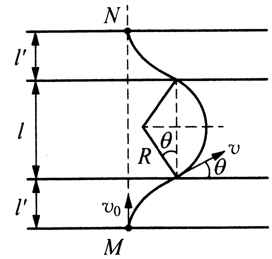


图 7-16-3

粒子在磁场中做匀速圆周运动，设半径为 R，由洛伦兹力公式和牛顿第二定律得

$$qvB = m\frac{v^2}{R} \quad ⑤$$

由几何关系得

$$l = 2R\cos\theta \quad ⑥$$

联立①②③④⑤⑥式得 $$v_0 = \frac{2El'}{Bl} \quad ⑦$$

(3) 由运动学公式和题给数据得 $$v_1 = v_0\cot\frac{\pi}{6} \quad ⑧$$

联立①②③⑦⑧式得 $$\frac{q}{m} = \frac{4\sqrt{3}El'}{B^2l^2} \quad ⑨$$

粒子由 M 点运动到 N 点所用的时间

$$t_0 = 2t + \frac{\frac{2\pi}{3}}{2\pi}T \quad ⑩$$

式中 T 是粒子在磁场中做匀速圆周运动的周期

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \quad ⑪$$

联立③⑦⑨⑩⑪式得 $$t_0 = \frac{Bl}{E} + \frac{\sqrt{3}\pi Bl^2}{18El'} \quad ⑫$$

考点伸展

16. 若原题中从 N 点出射的电量为 q 的粒子随后进入一垂直纸面向外的匀强磁场 B'，沿着半圆周运动而到达记录它的照相底片 P 上。实验测得：它在 P 上的位置到 N 的距离为 a，粒子束流的电流为 I。若粒子到达照相底片后全部被底片吸收，求粒子束作用于照相底片的作用力和粒子质量 m。

17. 2018 年全国理综Ⅰ卷第 25 题

如图 7－17－1 所示，在 $y>0$ 的区域存在方向沿 y 轴负方向的匀强电场，场强大小为 E；在 $y<0$ 的区域存在方向垂直于 xOy 平面向外的匀强磁场。一个氕核 ${}^1_1\mathrm{H}$ 和一个氘核 ${}^2_1\mathrm{H}$ 先后从 y 轴上 $y=h$ 点以相同的动能射出，速度方向沿 x 轴正方向。已知 ${}^1_1\mathrm{H}$ 进入磁场时，速度方向与 x 轴正方向的夹角为 $60°$，并从坐标原点 O 处第一次射出磁场。${}^1_1\mathrm{H}$ 的质量为 m，电荷量为 q。不计重力。求

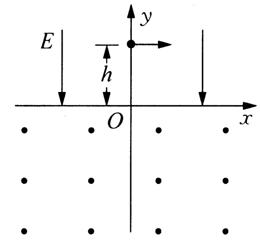


图 7－17－1

(1) ${}^1_1\mathrm{H}$ 第一次进入磁场的位置到原点 O 的距离；

(2) 磁场的磁感应强度大小；

(3) ${}^2_1\mathrm{H}$ 第一次离开磁场的位置到原点 O 的距离。

思路点拨

1. 氕核 ${}^1_1\mathrm{H}$ 在电场中运动时，沿电场方向的位移大小为 h，初速度为 0，加速度为 $a=\dfrac{qE}{m}$，由此可求得氕核 ${}^1_1\mathrm{H}$ 在电场中运动的时间，也可求得沿电场方向的分速度。当 ${}^1_1\mathrm{H}$ 进入磁场时，速度方向与 x 轴正方向的夹角为 $60°$，即可求得其沿垂直电场方向的速度，从而求得 ${}^1_1\mathrm{H}$ 第一次进入磁场的位置到原点 O 的距离。

2. 氕核 ${}^1_1\mathrm{H}$ 进入磁场后，做半径为 $r=\dfrac{mv}{qB}$ 的圆周运动，从坐标原点 O 处第一次射出磁场，前面已求得氕核进入磁场时的速度 v，以及进入磁场时的位置到原点 O 的距离，根据几何关系，可求得轨道圆的半径，由半径公式求得磁感应强度 B。

3. 氕核 ${}^1_1\mathrm{H}$ 和氘核 ${}^2_1\mathrm{H}$ 电荷量相同而质量不同。分析氘核在电场中的运动，在垂直电场方向上，由于氘核与氕核同的动能相同，所以初速度为氕核的 $\dfrac{\sqrt{2}}{2}$；沿电场方向上，由于氘核质量为氕核的 2 倍，则加速度为氕核的 $\dfrac{1}{2}$，位移相同，所以获得速度为氕核的 $\dfrac{\sqrt{2}}{2}$，运动时间为 $\sqrt{2}$ 倍。由此可知，氘核与氕核进入磁场的位置相同，进入磁场的速度方向相同，大小为氕核 $\dfrac{\sqrt{2}}{2}$ 倍。再由半径公式 $r=\dfrac{mv}{qB}$ 求得磁场中运动的轨道半径，根据几何关系即可求得 ${}^2_1\mathrm{H}$ 第一次离开磁场的位置。

满分解答

(1) ${}^1_1\mathrm{H}$ 在电场中做类平抛运动，在磁场中做圆周运动，运动轨迹如图 7－17－2 所示。设 ${}^1_1\mathrm{H}$ 在电场中的加速度大小为 a_1，初速度大小为 v_1，它在电场中的运动时间为 t_1，第一次进入磁场的位置到原点 O 的距离为 s_1。由运动学公式有

$$s_1=v_1t_1 \quad ①$$

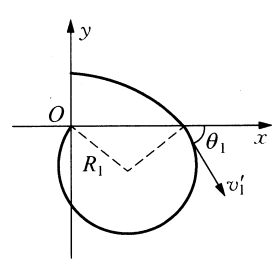


图 7－17－2

$$h=\frac{1}{2}a_1t_1^2 \quad ②$$

由题给条件，${}_1^1\mathrm{H}$ 进入磁场时速度的方向与 x 轴正方向夹角 $\theta_1=60°$。${}_1^1\mathrm{H}$ 进入磁场时速度的 y 分量的大小为

$$a_1t_1=v_1\tan\theta_1 \quad ③$$

联立以上各式得

$$s_1=\frac{2\sqrt{3}}{3}h \quad ④$$

(2) ${}_1^1\mathrm{H}$ 在电场中运动时，由牛顿第二定律有

$$qE=ma_1 \quad ⑤$$

设 ${}_1^1\mathrm{H}$ 进入磁场时速度的大小为 v_1'，由速度合成法则有

$$v_1'=\sqrt{v_1^2+(a_1t_1)^2} \quad ⑥$$

设磁感应强度大小为 B，${}_1^1\mathrm{H}$ 在磁场中运动的圆轨道半径为 R_1，由洛伦兹力公式和牛顿第二定律有

$$qv_1'B=\frac{mv_1'^2}{R_1} \quad ⑦$$

由几何关系得

$$s_1=2R_1\sin\theta_1 \quad ⑧$$

联立以上各式得

$$B=\sqrt{\frac{6mE}{qh}} \quad ⑨$$

(3) 设 ${}_1^2\mathrm{H}$ 在电场中沿 x 轴正方向射出的速度大小为 v_2，在电场中的加速度大小为 a_2，由题给条件得

$$\frac{1}{2}(2m)v_2^2=\frac{1}{2}mv_1^2 \quad ⑩$$

由牛顿第二定律有

$$qE=2ma_2 \quad ⑪$$

设 ${}_1^2\mathrm{H}$ 第一次射入磁场时的速度大小为 v_2'，速度的方向与 x 轴正方向夹角为 θ_2，入射点到原点的距离为 s_2，在电场中运动的时间为 t_2。由运动学公式有

$$s_2=v_2t_2 \quad ⑫$$

$$h=\frac{1}{2}a_2t_2^2 \quad ⑬$$

$$v_2'=\sqrt{v_2^2+(a_2t_2)^2} \quad ⑭$$

$$\sin\theta_2=\frac{a_2t_2}{v_2'} \quad ⑮$$

联立以上各式得

$$s_2=s_1,\ \theta_2=\theta_1,\ v_2'=\frac{\sqrt{2}}{2}v_1' \quad ⑯$$

设${}_1^2$H在磁场中做圆周运动的半径为R_2，由⑦⑯式及粒子在匀强磁场中做圆周运动的半径公式得

$$R_2=\frac{(2m)v_2'}{qB}=\sqrt{2}R_1 \quad ⑰$$

所以出射点在原点左侧。设${}_1^2$H进入磁场的入射点到第一次离开磁场的出射点的距离为s_2'，由几何关系有

$$s_2'=2R_2\sin\theta_2 \quad ⑱$$

联立④⑧⑯⑰⑱式得，${}_1^2$H第一次离开磁场时的位置到原点O的距离为

$$s_2'-s_2=\frac{2\sqrt{3}}{3}(\sqrt{2}-1)h \quad ⑲$$

考点伸展

17. 原题中如果其他条件不变，而${}_1^1$H的初动能变为原来的2倍，求${}_1^1$H第一次离开磁场的位置到原点O的距离。

18. 2018年北京理综卷第24题

（1）静电场可以用电场线和等势面形象描述。

a. 请根据电场强度的定义和库仑定律推导出点电荷Q的场强表达式；

b. 点电荷的电场线和等势面分布如图7－18－1所示，等势面S_1、S_2到点电荷的距离分别为r_1、r_2。我们知道，电场线的疏密反映了空间区域电场强度的大小。请计算S_1、S_2上单位面积通过的电场线条数之比N_1/N_2。

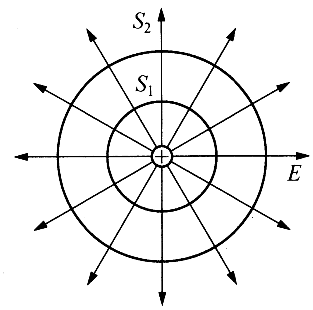


图7－18－1

（2）观测宇宙中辐射电磁波的天体，距离越远单位面积接收的电磁波功率越小，观测越困难。为了收集足够强的来自天体的电磁波，增大望远镜口径是提高天文观测能力的一条重要路径。2016年9月25日，世界上最大的单口径球面射电望远镜FAST在我国贵州落成启用，被誉为“中国天眼”。FAST直径为500 m，有效提高了人类观测宇宙的精度和范围。

a. 设直径为100 m的望远镜能够接收到的来自某天体的电磁波功率为P_1，计算FAST能够接收到的来自该天体的电磁波功率P_2；

b. 在宇宙大尺度上，天体的空间分布是均匀的，仅以辐射功率为P的同类天体为观测对象，设直径为100 m望远镜能够观测到的此类天体数目是N_0，计算FAST能够观测到的此类天体数目N。

思路点拨

本题是一道以“中国天眼”为背景创设的情景题，挖掘以下隐含条件是解答本题的关键。

（1）电场线由正点电荷出发终止于无穷远处，穿过以它为球心的各球面的电场线条数相等。

（2）天体以光速向四周辐射电磁波，能量在传播过程中，在以它为球心的球面上均匀分布。因此地球上不同望远镜观测同一天体，单位面积上接收的功率相同。

（3）在宇宙大尺度上，天体的空间分布是均匀的。一个望远镜能观测到的辐射功率为P的同类天体的数目正比于以望远镜为球心、以最远观测距离为半径的球体体积。

满分解答

解：（1）a. 在距Q为r的位置放一电荷量为q的检验电荷根据库仑定律，检验电荷受到的电场力

$$F = k\frac{Qq}{r^2}$$

根据电场强度的定义

$$E = \frac{F}{q}$$

得 $$E = k\frac{Q}{r^2}$$

b. 穿过每个等势面的电场线的总条数相等，故穿过两等势面单位面积上的电场线条数之比

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

(2) a. 地球上不同的望远镜观测同一天体，单位面积上接收的功率相同，因此

$$P_2 = \frac{500^2}{100^2}P_1 = 25P_1$$

b. 在宇宙大尺度上，天体的空间分布是均匀的。因此一个望远镜能观测到的此类天体数目正比于以望远镜为球心、以最远观测距离为半径的球体体积。

设地面上望远镜能观测到此类天体需收集到的电磁波的总功率的最小值为 P_0，直径为 100 m 望远镜和 FAST 能观测到的最远距离分别为 L_0 和 L，则

$$P_0 = \pi\left(\frac{500}{2}\right)^2\frac{P}{4\pi L^2} = \pi\left(\frac{100}{2}\right)^2\frac{P}{4\pi L_0^2}$$

可得 $$L = 5L_0$$

则 $$N = \frac{L^3}{L_0^3}N_0 = 125N_0$$

考点伸展

18. 太阳光垂直射到地面上时，地面上 1 m^2 面积接受的太阳光的功率约为 1.4 kW（忽略大气的反射吸收等），其中可见光约占 45%。

(1) 假设可见光的波长约为 0.55 μm，日地间距离 $R = 1.5\times10^{11}$ m，普朗克常量 $h = 6.6\times10^{-34}$ J·s，估算太阳每秒辐射出的可见光光子数。

(2) 若已知地球的半径为 6.4×10^6 m，估算地球接受的太阳光的总功率。

专题八　电磁感应与交变电流

1. 2014年江苏模拟卷

如图8-1-1所示，两个端面半径同为R的圆柱形铁芯同轴水平放置，相对的端面之间有一缝隙，铁芯上绕导线并与电源连接，在缝隙中形成一匀强磁场。一铜质细直棒ab水平置于缝隙中，且与圆柱轴线等高、垂直。让铜棒从静止开始自由下落，铜棒下落距离为0.2R时铜棒中电动势大小为E_1，下落距离为0.8R时电动势大小为E_2。忽略涡流损耗和边缘效应。关于E_1、E_2的大小和铜棒离开磁场前两端的极性，下列判断中正确的是(　　)。

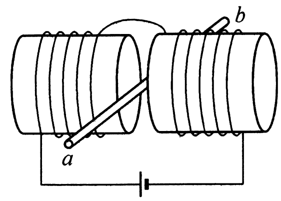


图8-1-1

A. $E_1 > E_2$，a端为正

B. $E_1 > E_2$，b端为正

C. $E_1 < E_2$，a端为正

D. $E_1 < E_2$，b端为正

思路点拨

本题考查安培定则、右手定则和感应电动势的计算。感应电动势$E=Blv$，其大小与棒切割磁感线的有效长度l及速度v有关，棒在缝隙中下落的距离从0.2R到0.8R时，速度v变大，但有效切割长度l变小，因此在比较E_1、E_2的大小时要看lv乘积的大小。利用右手定则可判断棒a、b两端的电势高低。

分析解答

由安培定则可判断缝隙中的磁场方向水平向左，由右手定则知感应电动势的b端为正，选项A、C错误；由$mgh=\frac{1}{2}mv^2$可得铜棒下落0.2R和0.8R时的速度大小分别为$v_1=\sqrt{0.4gR}$和$v_1=\sqrt{1.6gR}$。由几何关系可得铜棒下落0.2R和0.8R时在磁场中的有效长度分别为$l_1=2\times\sqrt{0.96}R$，$l_1=2\times\sqrt{0.36}R$。根据$E=Blv$，可得$\frac{E_1}{E_2}=\frac{\sqrt{0.96}\times\sqrt{0.4gR}}{\sqrt{0.36}\times\sqrt{1.6gR}}<1$，故$E_1<E_2$。本题的答案为D。

考点伸展

1.(2019年全国理综Ⅰ卷)空间存在一方向与纸面垂直、大小随时间变化的匀强磁场，其边界如图8-1-2中虚线MN所示，一硬质细导线的电阻率为ρ、横截面积为S，将该导线做成半径为r的圆环固定在纸面内，圆心O在MN上。$t=0$时磁感应强度的方向如图8-1-2所示。磁感应强度B随时间t的变化关系如图8-1-3所示，则在$t=0$到$t=t_1$的时间间隔内(　　)。

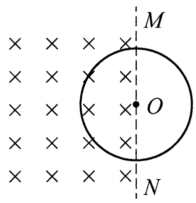


图 8-1-2

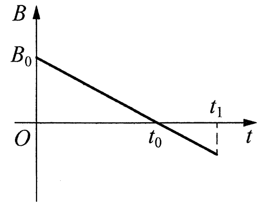


图 8-1-3

A．圆环所受安培力的方向始终不变

B．圆环中的感应电流始终沿顺时针方向

C．圆环中的感应电流大小为$\frac{B_0 rS}{4t_0\rho}$

D．圆环中的感应电动势大小为$\frac{B_0\pi r^2}{4t_0}$

2. 2013 年四川理综卷第 7 题

如图 8-2-1 所示，边长为 L、不可形变的正方形导线框内有半径为 r 的圆形磁场区域，其磁感应强度 B 随时间 t 的变化关系为 $B=kt$（常量 $k>0$）。回路中滑动变阻器 R 的最大阻值为 R_0，滑动片 P 位于滑动变阻器中央，定值电阻 $R_1=R_0$、$R_2=\frac{R_0}{2}$。闭合开关 S，电压表的示数为 U，不考虑虚线 MN 右侧导体的感应电动势，则(　　)。

A. R_2 两端的电压为 $U/7$

B. 电容器的 a 极板带正电

C. 滑动变阻器 R 的热功率为电阻 R_2 的 5 倍

D. 正方形导线框中的感应电动势为 kL^2

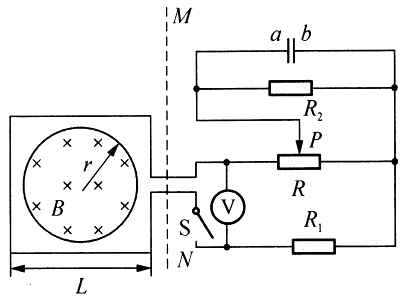


图 8-2-1

思路点拨

本题属于电磁感应中的电路问题，考查学生对于法拉第电磁感应定律、电阻串并联规律、焦耳定律、右手定则等的掌握情况。这类题一般的解题思路是：由感应电动势和总电阻求得电流，利用电阻的串并联规律分析电路中各元件的电压和电流，由焦耳定律求得各元件的热功率。左侧的导体框相当于电源，求感应电动势时要利用磁场面积而不是线框面积，判断电容器的极板电性时，要先利用右手定则判定电路中感应电流的方向。

分析解答

由法拉第电磁感应定律有 $E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{\Delta B}{\Delta t}\cdot S=k\pi r^2$，D 选项错误；电路左侧的变化磁场在正方形导线框中产生逆时针方向的感应电流，导线框相当于一个上负下正的电源，所以电容器 a 板带负电，B 选项错误；R_2 与滑动变阻器的右半部分电阻并联，并联电阻为 $R_0/4$，外电路的总电阻为 $R_1+\frac{R_0}{4}+\frac{R_0}{2}=\frac{7}{4}R_0$，故 R_2 两端的电压为 $\frac{R_0/4}{7R_0/4}U=\frac{U}{7}$，A 选项正确；设干路电流为 I，通过 R_2 的电流为 $I/2$，R_2 的热功率 $P_2=\left(\frac{I}{2}\right)^2\cdot\frac{R_0}{2}=\frac{I^2R_0}{8}$。滑动变阻器的热功率 $P=I^2\cdot\frac{R_0}{2}+\left(\frac{I}{2}\right)^2\cdot\frac{R_0}{2}=\frac{5}{8}I^2R_0$，所以滑动变阻器 R 的热功率为电阻 R_2 的 5 倍，选项 C 正确。本题答案为 AC。

考点伸展

2.（2019 年全国理综Ⅲ卷）如图 8-2-2 所示，方向竖直向下的匀强磁场中有两根位于同一水平面内的足够长的平行金属导轨，两相同的光滑导体棒 ab、cd 静止在导轨上。$t=0$ 时，棒 ab 以初速度 v_0 向右滑动。运动过程中，ab、cd 始终与导轨垂直并接触良好，两者速度分别用 v_1、v_2

表示，回路中的电流用 I 表示。下列图象中可能正确的是(　　)。

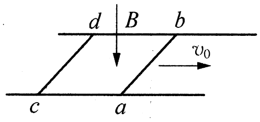
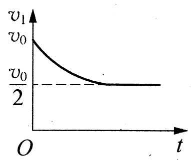
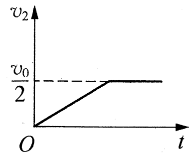


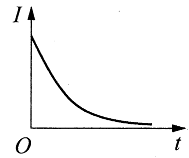
图 8-2-2



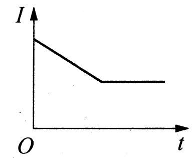
A.



B.



C.



D.

3. 2017 年海南物理卷第 10 题

如图 8-3-1 所示，空间中存在一匀强磁场区域，磁场方向与竖直面（纸面）垂直，磁场的上、下边界（图中虚线）均为水平面；纸面内磁场上方有一个正方形导线框 $abcd$，其上、下两边均与磁场边界平行，边长小于磁场上、下边界的间距。若线框自由下落，从 ab 边进入磁场时开始，直至 ab 边到达磁场下边界为止，线框下落的速度大小可能（　　）。

A. 始终减小

B. 始终不变

C. 始终增加

D. 先减小后增加

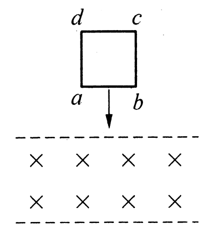


图 8-3-1

思路点拨

本题考查了牛顿第二定律，匀变速直线运动的公式等知识点，在近几年的各省高考题中出现的频率较高，常与匀变速直线运动的图象等知识点交汇命题。本题中由于线框下落高度未知，则线框进入磁场时可能存在受到的安培力无法判断，可能恰好等于其重力，也可能大于其重力，也可能小于其重力，要分具体情况分析讨论。

分析解答

设线框的质量为 m，线框的边长为 L，磁感应强度为 B，由于线框从某一高度处自由下落，当 ab 边进入磁场时，如果此时 ab 边受到的安培力等于线框的重力，即 $BIL=mg$，线框匀速进入磁场，但于线框边长小于磁场上、下边界的间距，则可知线框完全进入磁场后到 ab 边到达磁场下边界为止，由于穿过线框的磁通量不变，线框仅受重力，这个过程线框做匀加速直线运动，即线框下落的速度先不变后增加；当 ab 边进入磁场时，如果此时 ab 边受到的安培力大于线框的重力，即 $BIL > mg$，线框减速进入磁场，同理，可知线框完全进入磁场后到 ab 边到达磁场下边界为止，线框做匀加速度运动，即线框下落的速度先减小，后增大；当 ab 边进入磁场时，如果此时 ab 边受到的安培力小于线框的重力，即 $BIL < mg$，线框加速进入磁场，同理可知，线框完全进入磁场后到 ab 边到达磁场下边界为止，线框做匀加速度运动，即线框下落的速度始终增加；综上分析可知，选项 CD 正确，选项 AB 错误。故本题的正确选项为 CD。

考点伸展

3.（2019 年北京市模拟题）课堂上，老师演示了一个有趣的电磁现象：将一铝管竖立，把一块直径比铝管内径小一些的圆柱形的强磁铁从铝管上端由静止释放，强磁铁在铝管中始终与管壁不接触。可以观察到，相比强磁铁自由下落，强磁铁在铝管中的下落会延缓许多。下课后，好奇的小明将一块较厚的泡沫塑料垫在电子秤上，再将这个铝管竖直固定在泡沫塑料上（用以消除电子秤内部铁磁性材料与磁铁相互作用的影响），如图 8-3-2 所示，重复上述实验操作。在强磁铁由静止释放至落到泡沫塑料上之前，关于强磁铁的

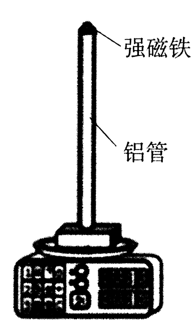


图 8-3-2

运动和受力情况，下列情况中可能发生的是(　　)。

A．先加速下落后减速下落

B．始终做加速运动，且加速度不断增大

C．所受合力方向竖直向上

D．所受铝管对它的作用力越来越大

4. 2015 年上海物理卷第 20 题

如图 8－4－1 所示，光滑平行金属导轨固定在水平面上，左端由导线相连，导体棒垂直静置于导轨上构成回路。在外力 F 作用下，回路上方的条形磁铁竖直向上做匀速运动。在匀速运动过程中外力 F 做功 W_F，磁场力对导体棒做功 W_1，磁铁克服磁场力做功 W_2，重力对磁铁做功 W_G，回路中产生的焦耳热为 Q，导体棒获得的动能为 E_k，则（　　）。

A. $W_1=0$

B. $W_2-W_1=Q$

C. $W_1=E_k$

D. $W_F+W_G=Q+E_k$

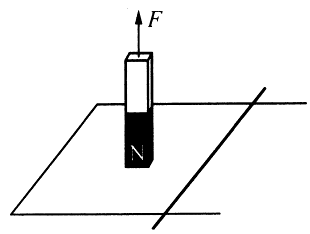


图 8－4－1

思路点拨

本题考查电磁感应中的能量转换的问题。条形磁铁向上运动时，回路中产生顺时针（俯视）方向的感应电流，由左手定则可知导体棒受到的安培力方向水平向右，导体棒运动以后，又会产生动生电动势。在既有动生电动势又有感生电动势的情况下，“克服安培力做功等于电路中产生的焦耳热”的结论不成立，况且本题中的导体棒受到的安培力做的是正功。在求回路中产生的焦耳热时，我们可以把本题的情景与如图 8－4－2 所示的情景进行类比：木块 m_2 放在光滑的水平面上，当 m_1 以一定的初速度冲上 m_2，最后两者相对静止，克服 m_1 摩擦力做的功，一部分转化为 m_2 的动能，一部分转化为系统内能，或者说系统摩擦生热等于克服一对滑动摩擦力所做的功。

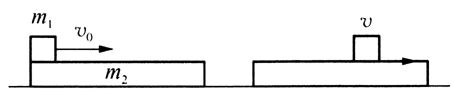


图 8－4－2

分析解答

对导体棒应用动能定理可得出 $W_1=E_k$ 的结论，选项 A 错误、C 正确；对磁铁应用动理定理有 $W_F+W_G-W_2=0$ ①。磁铁克服磁场力做的功 W_2，一部分转化为导体棒的动能，一部分转化为回路中产生的焦耳热，即 $W_2=E_k+Q$ ②，选项 B 正确；由①②式可得 $W_F+W_G=Q+E_k$，选项 D 正确。从磁场力对磁铁、导体棒做功之和的绝对值等于系统产生的焦耳热的角度也可看出选项 B 正确。本题答案为 BCD。

考点伸展

4.（2018 年江苏物理卷）如图 8－4－3 所示，竖直放置的 ∩ 形光滑导轨宽为 L，矩形匀强磁场 Ⅰ、Ⅱ 的高和间距均为 d，磁感应强度为 B。质量为 m 的水平金属杆由静止释放，进入磁场 Ⅰ 和 Ⅱ 时的速度相等。金属杆在导轨间的电阻为 R，与导轨接触良好，其余电阻不计，重力加速度为 g。金属杆（　　）。

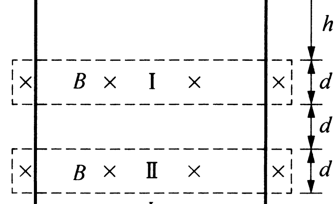


图 8－4－3

A. 刚进入磁场 Ⅰ 时加速度方向竖直向下

B．穿过磁场Ⅰ的时间大于在两磁场之间的运动时间

C．穿过两磁场产生的总热量为 $4mgd$

D．释放时距磁场Ⅰ上边界的高度 h 可能小于$\frac{m^2gR^2}{2B^4L^4}$

5. 2014 年浙江模拟卷

如图 8-5-1 所示，在铁芯上、下分别绕有匝数 $n_1=800$ 和 $n_2=200$ 的两个线圈，上线圈两端与 $u=51\sin 314t$ V 的交流电源相连，将下线圈两端接交流电压表，则交流电压表的读数可能是(　　)。

A. 2.0 V

B. 9.0 V

C. 12.7 V

D. 144.0 V

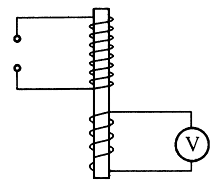


图 8-5-1

思路点拨

本题考查实际变压器与理想变压器的区别、交流电最大值与有效值的区别及交流电表的读数等问题，着意引导学生不死记公式，在应用公式时能够关注它的成立条件。变压器的原副线圈电压之比等于两个线圈的匝数之比，即 $\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$，这个规律只适用于理想变压器，对于有漏磁的实际变压器并不成立。

分析解答

上线圈所接交流电源的有效值为 $U_1=\frac{51}{\sqrt{2}}$ V，如果是理想变压器，则有$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$，代入 $n_1=800$ 匝、$n_2=200$ 匝，可得下线圈两端电压有效值 $U_2\approx 9.0$ V。很容易错选 B。考虑到铁芯不是闭合铁芯，存在着漏磁现象，变压比公式对于实际变压器并不成立，故交流电压表的读数应小于 9.0 V，所以答案为 A。

考点伸展

5. (2018 年天津理综卷)教学用发电机能够产生正弦式交变电流。利用该发电机(内阻可忽略)通过理想变压器向定值电阻 R 供电，电路 8-5-2 如图所示，理想交流电流表 A、理想交流电压表 V 的读数分别为 I、U，R 消耗的功率为 P。若发电机线圈的转速变为原来的$\frac{1}{2}$，则(　　)。

A. R 消耗的功率变为$\frac{1}{2}P$

B. 电压表 V 的读数为$\frac{1}{2}U$

C. 电流表 A 的读数变为 $2I$

D. 通过 R 的交变电流频率不变

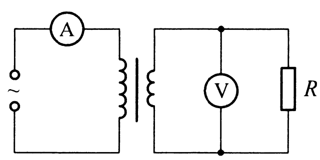


图 8-5-2

第三部分
力电综合

专题九　带电粒子在复合场中的运动

1. 2016年四川理综卷第14题

如图9-1-1所示，纸面内有竖直线DD'，过DD'且垂直于纸面的平面将空间分成Ⅰ、Ⅱ两区域。区域Ⅰ有方向竖直向上的匀强电场和方向垂直于纸面的匀强磁场B(图中未画出)；区域Ⅱ有固定在水平地面上高$h=2l$、倾角$\alpha=\frac{\pi}{4}$的光滑绝缘斜面，斜面顶端与直线DD'距离$s=4l$，区域Ⅱ可加竖直方向的大小不同的匀强电场(图中未画出)；C点在DD'上，距地面高$H=3l$。零时刻，质量为m、带电量为q的小球P在K点具有大小$v_0=\sqrt{gl}$、方向与水平面夹角$\theta=\frac{\pi}{3}$的速度。

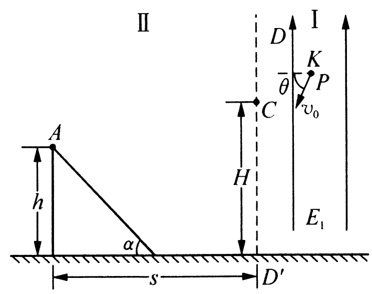


图9-1-1

在区域Ⅰ内做半径$r=\frac{3l}{\pi}$的匀速圆周运动，经C点水平进入区域Ⅱ。某时刻，不带电的绝缘小球A由斜面顶端静止释放，在某处与刚运动到斜面的小球P相遇。小球视为质点。不计空气阻力及小球P所带电量对空间电磁场的影响。l已知，g为重力加速度。

(1) 求匀强磁场的磁感应强度B的大小；

(2) 若小球A、P在斜面底端相遇，求释放小球A的时刻t_A；

(3) 若小球A、P在时刻$t=\beta\sqrt{\frac{l}{g}}$($\beta$为常数)相遇于斜面某处，求此情况下区域Ⅱ的匀强电场的场强E，并讨论场强E的极大值和极小值及相应的方向。

思路点拨

本题是带电粒子在复合场中做匀速圆周运动和类平抛运动及相遇问题的一个组合题，粒子在两个区域内的运动是完全独立的，分别考虑粒子在区域Ⅰ和区域Ⅱ的运动可以很大程度降低思考的难度，同时抓住粒子A和粒子P的运动也是独立的，它们只有时间上的相关性。

1. 粒子P在区域Ⅰ内在重力场、电场、磁场同时存在的区域做匀速圆周运动，显然，粒子所受的重力与电场力平衡，洛伦兹力提供向心力，好像电场和重力场不存在一样。

2. 粒子P进入区域Ⅱ后，做类平抛运动，电场的存在只影响粒子在竖直方向的加速度大小。粒子P的初速度是确定的，落点的位置是确定的，根据类平抛运动水平方向做匀速运动的规律，即可求出粒子P运动的时间。再根据相遇条件确定粒子A在斜面上运动的时间。

3. 小球A、P相遇于斜面某处，实际上是小球P做类平抛运动的落点在斜面上。要充分利用类平抛运动的规律，以抛出点C为原点，建立直角坐标，斜面上落点的位置x、y坐标满足一

定的关系，利用这个关系，即可求出竖起方向的加速度，从而根据牛顿第二定律求出场强的大小。

满分解答

解：(1) 小球 P 在Ⅰ区做匀速圆周运动，则小球 P 必定带正电且所受电场力与重力大小相等。设Ⅰ区磁感应强度大小为 B，由洛伦兹力提供向心力得

$$qv_0B = m\frac{v_0^2}{r} \quad ①$$

$$B = \frac{mv_0}{qr} \quad ②$$

将 $r = \frac{3l}{\pi}$ 代入得

$$B = \frac{\pi m}{3ql}\sqrt{gl} \quad ③$$

(2) 小球 P 先在Ⅰ区以 D 为圆心做匀速圆周运动，由小球初速度和水平方向夹角为 θ 可得，小球将偏转 θ 角后自 C 点水平进入Ⅱ区做类平抛运动到斜面底端 B 点，如图 9-1-2 所示。设做匀速圆周运动的时间为 t_1，类平抛运动的时间为 t_2，则

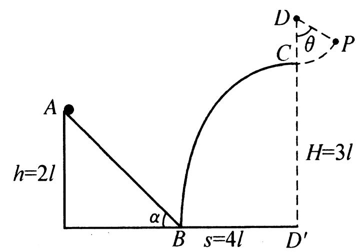


图 9-1-2

$$t_1 = \frac{\overset{\frown}{PC}}{v_0} \quad ④$$

而 $\overset{\frown}{PC} = \theta r$，$\theta = \frac{\pi}{3}$，$r = \frac{3l}{\pi}$，$v_0 = \sqrt{gl}$ 代入可得

$$t_1 = \sqrt{\frac{l}{g}} \quad ⑤$$

进入区域Ⅱ，小球 P 在水平方向做匀速运动，则

$$t_2 = \frac{BD'}{v_0} \quad ⑥$$

根据几何关系可得 $BD' = s - 2l\cot\alpha = 2l$，即

$$t_2 = 2\sqrt{\frac{l}{g}} \quad ⑦$$

小球 A 自斜面顶端释放后将沿斜面向下做匀加速直线运动，设加速度的大小为 a_1，释放后在斜面上运动时间为 t_3。对小球 A 受力分析，设小球质量为 m'，斜面对小球的支持力为 N，如图 9-1-3 所示。由牛顿第二定律得

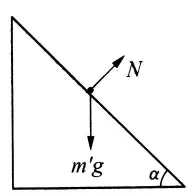


图 9-1-3

$$m'g\sin\alpha = m'a_1 \quad ⑧$$

$$\frac{2l}{\sin\alpha}=\frac{1}{2}a_1 t_3^2 \qquad ⑨$$

联立⑧⑨式可得

$$t_3=2\sqrt{\frac{2l}{g}} \qquad ⑩$$

小球 A 的释放时刻 t_A 满足

$$t_A=t_1+t_2-t_3 \qquad ⑪$$

联立⑤⑩⑪式得 $$t_A=(3-2\sqrt{2})\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad ⑫$$

(3) 小球 A、P 在 $t=\beta\sqrt{\frac{l}{g}}$ 时相遇，即小球 P 运动的时间为 t。小球先做 t_1 时间的匀速圆周运动，然后自 C 点进入Ⅱ区做类平抛运动，设运动时间为 t_4，电场强度为 E，加速度为 a_2，以竖直向下为正，有

$$t=t_1+t_4 \qquad ⑬$$

$$qE+mg=ma_2 \qquad ⑭$$

类平抛运动在水平方向，竖直方向满足

$$x=v_0t_4、y=\frac{1}{2}a_2t_4^2 \qquad ⑮$$

由图 9-1-4 中几何关系，有

$$H-y=x-2l \qquad ⑯$$

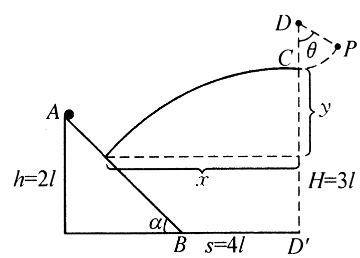


图 9-1-4

联立⑤⑬⑭⑮⑯式得 $$E=\frac{11-\beta^2}{(\beta-1)^2}\frac{mg}{q} \qquad ⑰$$

小球 P 落在斜面上，有 $2l\leqslant x\leqslant 4l$，$l\leqslant y\leqslant 3l$，则

$$2\sqrt{\frac{l}{g}}\leqslant t_4=\frac{x}{v_0}\leqslant 4\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad ⑱$$

所以

$$3\leqslant\beta\leqslant 5 \qquad ⑲$$

由⑰式可知当 $\beta>1$ 时，E 随 β 的增大而减小，将⑲式代入⑰式可得

$$-\frac{7mg}{8q}\leqslant E\leqslant\frac{mg}{2q} \qquad ⑳$$

其中“+、−”代表方向，电场强度向上时其大小的范围为 $0\leqslant E\leqslant\frac{7mg}{8q}$，电场强度向下时其大小的范围为 $0\leqslant E\leqslant\frac{mg}{2q}$。所以场强的极大值为 $\frac{7mg}{8q}$，方向竖直向上；场强的极小值为 0。

考点伸展

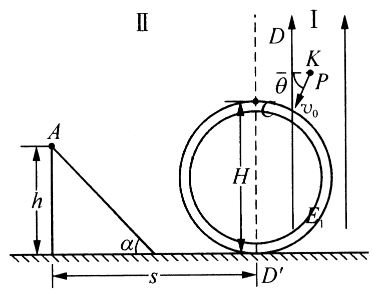


图 9-1-5

1. 已知原题区域Ⅱ内存在的电场恰好使小球 P 运动到斜面底端。现加一个绝缘光滑圆环轨道，如图 9-1-5 所示。圆环的圆心在 DD' 上，直径也为 $H=3l$，C 为最高点，C 点有一小缺口（图中未画出），小球 P 从 K 运动到 C 后恰好进入圆环轨道，试求出小球 P 第一次、第二次、第 n 次返回 C 速度大小。你的解答在科学性上成立吗？

2. 2015年福建理综卷第22题

如图9-2-1所示，绝缘粗糙的竖直平面 MN 左侧同时存在相互垂直的匀强电场和匀强磁场，电场方向水平向右，电场强度大小为 E，磁场方向垂直纸面向外，磁感应强度大小为 B。一质量为 m、电荷量为 q 的带正电的小滑块从 A 点由静止开始沿 MN 下滑，到达 C 点时离开 MN 做曲线运动。A、C 两点间距离为 h，重力加速度为 g。

(1) 求小滑块运动到 C 点时的速度大小 v_c；

(2) 求小滑块从 A 点运动到 C 点过程中克服摩擦力做的功 W_f；

(3) 若 D 点为小滑块在电场力、洛伦兹力及重力作用下运动过程中速度最大的位置，当小滑块运动到 D 点时撤去磁场，此后小滑块继续运动到水平地面上的 P 点。已知小滑块在 D 点时的速度大小为 v_D，从 D 点运动到 P 点的时间为 t，求小滑块运动到 P 点时速度的大小 v_P。

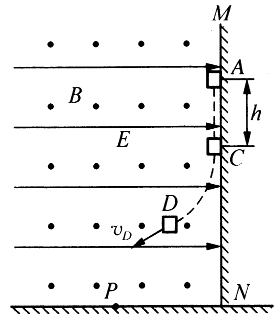


图9-2-1

思路点拨

本题是考察带电小滑块在重力场、匀强电场、匀强磁场三个场同时存在的空间中的运动情况，对于这类问题，我们的头脑中要有这样一条分析思路：(1)明确研究对象，进行受力分析；(2)根据受力情况确定物体做什么运动。

1. 带电小滑块沿着绝缘粗糙的竖直平面由静止下滑，对小滑块进行受力分析如图9-2-2所示。初始，洛伦兹力 $F_{洛}=qvB$ 小于电场力 $F=qE$，滑块与平面相互挤压存在弹力 F_N，下滑过程中随着 $F_{洛}$ 增加，F_N 减小，F_f 减小，加速度增大，速度 v 增大，当满足 $qv_cB=qE$ 时，$F_N=0$，此时滑块恰好到达 C 点离开竖直平面，由此可得 $v_c=\dfrac{E}{B}$。

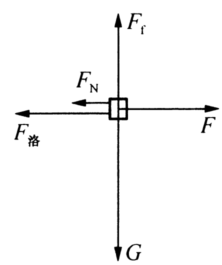


图9-2-2

2. 小滑块从开始运动到 C 点离开的过程中只有重力和摩擦力做功，由动能定理——合外力做功对应滑块动能的变化，即可求得克服摩擦力做功的数值。

3. 带电小滑块离开竖直平面后受到重力、电场力和洛伦兹力的作用，做非匀变速曲线运动，由于洛伦兹力不做功，则重力和电场力的合力 F_{eg} 做功从而改变了滑块的速度大小。当合力 F_{eg} 与速度 v 相互垂直时，合力不做功，速度达到最大值 v_D。注意此时洛伦兹力 $F_{洛}=qv_DB\neq F_{eg}$，否则滑块将做匀速直线运动了。

4. 带电小滑块运动到速度最大的 D 点时撤去磁场，此时所受合力 F_{eg} 与速度 v 相互垂直，小滑块将做类平抛运动到达 P 点，由平抛运动，相互垂直的两个方向上的速度的矢量合成可得 P 点速度的大小。

满分解答

(1) 带电小滑块沿着绝缘粗糙的竖直平面由静止下滑，对小滑块进行受力分析如图9-2-2

所示。运动过程中水平方向受力满足

$$qvB + F_N = qE \quad ①$$

小滑块在 C 点离开 MN 时

$$F_N = 0 \quad ②$$

解得

$$v_C = \frac{E}{B} \quad ③$$

(2) 小滑块从静止开始运动到 C 点离开的过程中只有重力和摩擦力做功，由动能定理可得

$$mgh - W_f = \frac{1}{2}mv_C^2 - 0 \quad ④$$

解得

$$W_f = mgh - \frac{mE^2}{2B^2} \quad ⑤$$

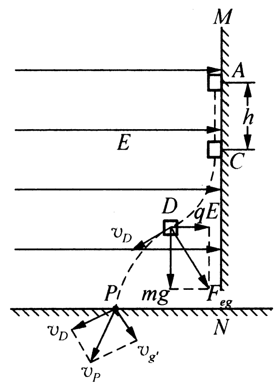


图 9－2－3

(3) 小滑块速度达到最大值 v_D 时，速度方向与重力、电场力的合力 F_{eg} 方向垂直，如图 9－2－3 所示。撤去磁场后小滑块将做类平抛运动，等效加速度为 g'。

$$g' = \sqrt{g^2 + \left(\frac{qE}{m}\right)^2} \quad ⑥$$

到达 P 点时，沿着合力方向的速度为 $v_{g'} = g't$，由速度的矢量合成法则可得

$$v_P^2 = v_D^2 + v_{g'}^2 \quad ⑦$$

解得

$$v_P = \sqrt{v_D^2 + \left[g^2 + \left(\frac{qE}{m}\right)^2\right]t^2}。 \quad ⑧$$

考点伸展

2. 原题中，若 D 点为小滑块在电场力、洛伦兹力及重力作用下运动过程中速度最大的位置，当小滑块运动到 D 点时仍保留磁场，(1)请画出小滑块此后运动的一小段大致的轨迹；(2)比较 D 点处洛伦兹力 $F_洛$ 与重力、电场力的合力 F_{eg} 的大小；(3)求出轨迹上 D 点处的曲率半径 R。

3. 2015 年北京理综卷第 24 题

真空中放置的平行金属板可以用作光电转换装置，如图 9－3－1 所示。光照前两板都不带电。以光照射 A 板，则板中的电子可能吸收光的能量而逸出。假设所有逸出的电子都垂直于 A 板向 B 板运动，忽略电子之间的相互作用。保持光照条件不变。a 和 b 为接线柱。

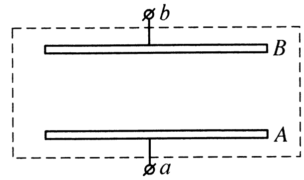


图 9－3－1

已知单位时间内从 A 板逸出的电子数为 N，电子逸出时的最大动能为 E_{km}，元电荷为 e。

（1）求 A 板和 B 板之间的最大电势差 U_m，以及将 a、b 短接时回路中的电流 $I_{短}$。

（2）图示装置可看作直流电源，求其电动势 E 和内阻 r。

（3）在 a 和 b 之间连接一个外电阻时，该电阻两端的电压为 U。外电阻上消耗的电功率设为 P；单位时间内到达 B 板的电子，在从 A 板运动到 B 板的过程中损失的动能之和设为 ΔE_k。请推导证明：$P=\Delta E_k$。

（注意：解题过程中需要用到、但题目没有给出的物理量，要在解题中做必要的说明）

思路点拨

（1）随着电子不断从 A 板逸出向 B 板运动，两板间的电势差会逐渐增大，当具有最大动能的电子也刚好不能到达 B 板时，电势差达到最大。当两板间短路时，回路中电流的大小决定于单位时间内从 A 板逸出的电子数。

（2）当外电路开路时，电源电动势的数值等于路端电压的大小。根据闭合电路欧姆定律 $I=\dfrac{E}{R_{外}+r}$，当 $R_{外}=0$ 时，内阻 $r=\dfrac{E}{I_{短}}$。

（3）a、b 间接外电阻后，稳定时该电阻两端的电压 U 等于两板间的电势差。电子从 A 板运动到 B 板过程中克服电场力做的功等于损失的动能 ΔE_k，即 $W_{克}=eU=\Delta E_k$，结合电流强度的定义，求出外电阻上消耗的功率 P 再与 ΔE_k 进行比较。

满分解答

解：（1）由动能定理得 $eU_m=E_{km}$，可得 $U_m=\dfrac{E_{km}}{e}$。

短路时所有逸出电子都到达 B 板，故短路电流 $I_{短}=\dfrac{q}{t}=Ne$。

（2）电源的电动势等于断路时的路端电压，即上面求出的 U_m，所以 $E=U_m=\dfrac{E_{km}}{e}$，电源内阻 $r=\dfrac{E}{I_{短}}=\dfrac{E_{km}}{Ne^2}$。

（3）外电阻两端的电压为 U，则电源两端的电压也是 U。

由动能定理，一个电子经电源内部电场后损失的动能 $\Delta E_{k1}=eU$，设单位时间内有 N' 个电子到达 B 板，则损失的动能之和 $\Delta E_k=N'\Delta E_{k1}=N'eU$，根据电流强度的定义，此时电源内部的电流 $I=N'e$，此时流过外电阻的电流也是 $I=N'e$，外电阻上消耗的电功率 $P=IU=N'eU$，所

以 $P = \Delta E_k$。

考点伸展

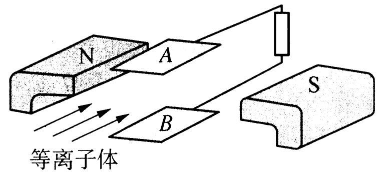


图 9－3－2

3. 磁流体发电机的原理如图 9－3－2 所示。在相距为 d，且足够长的金属板 A、B 之间有一个磁感应强度为 B 的匀强磁场。将一束等离子体（即高温下电离的气体，含有大量带正电和负电的微粒，从整体来说呈中性）以垂直于 B 的方向射入磁场，设每个离子的速度大小为 v，电荷量为 e，这时两板上就会聚集电荷。如果把 A、B 和用电器连接，A、B 就是一个直流电源的两个电极。(1)图中哪个极板是电源的正极？(2)电源的电动势多大？(3)设单位时间内有 n 对一价正、负离子射入两板间，则电源的最大功率多大？

4. 2015年上海理综卷第33题

如图9－4－1所示，在场强大小为E、水平向右的匀强电场中，一轻杆可绕固定转轴O在竖直平面内自由转动。杆的两端分别固定两电荷量均为q的小球A、B，A带正电，B带负电；A、B两球到转轴O的距离分别为$2l$、l，所受重力大小均为电场力大小的$\sqrt{3}$倍。开始时杆与电场间夹角为θ（$90^\circ \leqslant \theta \leqslant 180^\circ$）。将杆从初始位置由静止释放，以$O$点为重力势能和电势能零点。求：

（1）初始状态的电势能E_p；

（2）杆在平衡位置时与电场间的夹角α；

（3）杆在电势能为零处的角速度ω。

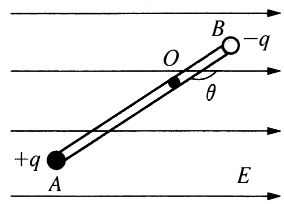


图9－4－1

思路点拨

本题(1)问中求初状态的电势能可直接用电场力做功和电势能变化之间的关系进行计算。在(2)问中分别作出A、B球的受力分析图，根据合力矩为零计算出夹角α。在(3)问中关键是杆在电势能为零处的位置有两种可能的情况，一种是A处于O点正下方，另一种是A处于O点正上方。根据能量守恒可以计算角速度的大小。在列能量守恒的关系式时分别写出初、末状态系统的总能量，这些能量包含电势能、重力势能和动能。

满分解答

(1) 因为以O点为重力势能和电势能零点，所以过O点作垂直于电场线的等势面（如图9－4－2所示）。由电势能的变化等于电场力所做的功可知

$$E_{pA} = qE \cdot \left[2l\sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)\right]$$

$$E_{pB} = qE \cdot \left[l\sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)\right]$$

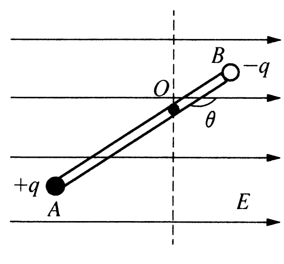


图9－4－2

故初始状态的电势能

$$E_p = E_{pA} + E_{pB} = -3qEl\cos\theta \quad ①$$

(2) 平衡位置如图9－4－3所示，设小球质量为m，由力矩平衡的条件可知

$$mg \cdot (2l\cos\alpha) - mgl\cos\alpha - qE \cdot (2l\sin\alpha) - qEl\sin\alpha = 0 \quad ②$$

由此得 $$\tan\alpha = \frac{mg}{3qE} = \frac{\sqrt{3}}{3} \quad ③$$

即 $$\alpha = 30^\circ \quad ④$$

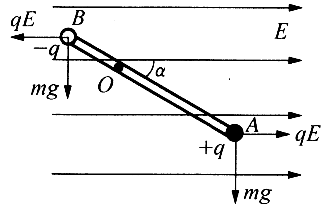


图9－4－3

(3) 电势能为零时，杆处于竖直位置，此时有两种可能情况如图 9-4-4、9-4-5 所示。

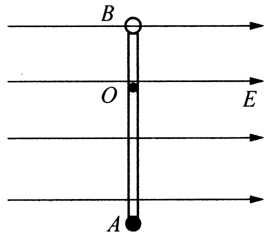


图 9-4-4

a) 当杆从初始位置转到 A 位于 O 正下方（如图 9-4-4 所示）过程中，A、B 以及杆所组成的系统能量守恒

$$-3qEl\cos\theta-mgl\sin\theta=\frac{5}{2}m\omega^2l^2-mgl \quad ⑤$$

解得 $$\omega=\sqrt{g\cdot\frac{2\sqrt{3}(1-\sin\theta)-6\cos\theta}{5\sqrt{3}l}} \quad ⑥$$

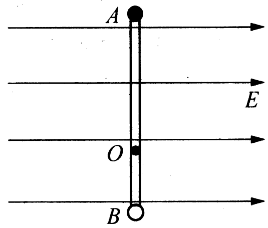


图 9-4-5

b) 当杆从初始位置转到 A 位于 O 正上方（如图 9-4-5 所示）过程中，A、B 以及杆所组成的系统能量守恒，

$$-3qEl\cos\theta-mgl\sin\theta=\frac{5}{2}m\omega^2l^2+mgl \quad ⑦$$

解得 $$\omega=\sqrt{g\cdot\frac{-2\sqrt{3}(1+\sin\theta)-6\cos\theta}{5\sqrt{3}l}} \quad ⑧$$

综上所述杆在电势能为零处的角速度可能为：

i) A 位于 O 点正下方处时 $\omega=\sqrt{g\cdot\frac{2\sqrt{3}(1-\sin\theta)-6\cos\theta}{5\sqrt{3}l}}$；

ii) A 位于 O 点正上方时 $\omega=\sqrt{g\cdot\frac{-2\sqrt{3}(1+\sin\theta)-6\cos\theta}{5\sqrt{3}l}}$。

考点伸展

4. a) 其他条件都不变，将原题第(3)问中计算“杆在电势能为零处的角速度 ω”改为“分析 A 能位于 O 点正上方应满足的初始条件”。

b) 其他条件都不变，将第(3)问中计算“杆在电势能为零处的角速度 ω”改为“求当 $\theta=150°$ 时，杆在摆动过程中角速度 ω 的最大值”。

专题十　电磁感应与力学综合

1. 2016年新课标理综Ⅲ卷第25题

如图10－1－1所示，两条相距 l 的光滑平行金属导轨位于同一水平面（纸面）内，其左端接一阻值为 R 的电阻；一与导轨垂直的金属棒置于两导轨上；在电阻、导轨和金属棒中间有一面积为 S 的区域，区域中存在垂直于纸面向里的均匀磁场，磁感应强度 B_1 随时间 t 的变化关系为 $B_1 = kt$，式中 k 为常量；在金属棒右侧还有一匀强磁场区域，区域左边界 MN（虚线）与导轨垂直，磁场的磁感应强度大小为 B_0，方向也垂直于纸面向里。某时刻，金属棒在一外加水平恒力的作用下从静止开始向右运动，在 t_0 时刻恰好以速度 v_0 越过 MN，此后向右做匀速运动。金属棒与导轨始终相互垂直并接触良好，它们的电阻均忽略不计。求：

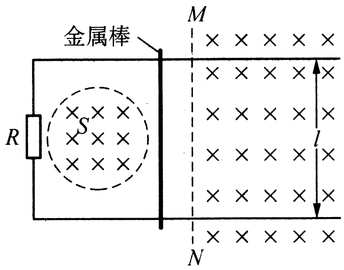


图10－1－1

(1) 在 $t = 0$ 到 $t = t_0$ 时间间隔内，流过电阻的电荷量的绝对值；

(2) 在时刻 $t(t > t_0)$ 穿过回路的总磁通量和金属棒所受外加水平恒力的大小。

思路点拨

本题考查的核心是法拉第电磁感应定律，再结合电路规律和平衡条件解决问题。

(1) 在金属棒没有进入右侧磁场之前，根据法拉第电磁感应定律，求出回路中的等效电源的感应电动势大小，再结合闭合电路欧姆定律及电流强度的定义式，从而导出电量的综合表达式。

(2) 当金属棒进入右侧磁场之后，回路中既有磁感应强度变化引起的感生电动势，又存在金属棒切割磁感线引起的动生电动势，问题比较复杂。但万变不离其宗，根据法拉第电磁感应定律只要求出磁通变化率即可。因此根据磁通量的概念 $\Phi = BS$，结合磁场方向，即可求解穿过回路的总磁通量，再根据磁通量的变化率，求得回路中的总感应电动势。然后依据闭合电路欧姆定律及安培力表达式，再依据平衡条件即可求解水平恒力大小。

满分解答

解：(1) 在金属棒未越过 MN 之前，t 时刻穿过金属棒与电阻 R 构成的回路的磁通量为

$$\Phi = ktS \qquad ①$$

设在从 t 时刻到 $t + \Delta t$ 的时间间隔内，回路磁通量的变化量为 $\Delta\Phi$，流过电阻 R 的电荷量为 Δq。由法拉第电磁感应定律有

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad ②$$

由欧姆定律有
$$I=\frac{\varepsilon}{R} \quad ③$$

由电流的定义有
$$I=\frac{\Delta q}{\Delta t} \quad ④$$

联立①②③④式得
$$|\Delta q|=\frac{kS}{R}\Delta t \quad ⑤$$

由⑤式得，在 $t=0$ 到 $t=t_0$ 的时间间隔内，流过电阻 R 的电荷量 q 的绝对值为
$$|q|=\frac{kt_0S}{R} \quad ⑥$$

（2）当 $t>t_0$ 时，金属棒已越过 MN。由于金属棒在 MN 右侧做匀速运动，若外加水平力为 f，设匀强磁场所施加的安培力为 F。根据平衡条件
$$f=F \quad ⑦$$

设此时回路中的电流为 I，则 F 的大小为
$$F=B_0Il \quad ⑧$$

此时金属棒与 MN 之间的距离为
$$s=v_0(t-t_0) \quad ⑨$$

匀强磁场穿过回路的磁通量为
$$\Phi'=B_0lS \quad ⑩$$

回路的总磁通量为
$$\Phi_t=\phi+\phi' \quad ⑪$$

式中，Φ 仍如①式所示。由①⑨⑩⑪式得，在时刻 t（$t>t_0$）穿过回路的总磁通量为
$$\Phi_t=kSt+B_0lv_0(t-t_0) \quad ⑫$$

在 t 到 $t+\Delta t$ 的时间间隔内，总磁通量的改变量 $\Delta\Phi_t$ 为
$$\Delta\Phi_t=(B_0lv_0+kS)\Delta t \quad ⑬$$

由法拉第电磁感应定律得，回路感应电动势的大小为
$$\varepsilon_t=\left|\frac{\Delta\Phi_t}{\Delta t}\right| \quad ⑭$$

由欧姆定律有
$$I=\frac{\varepsilon_t}{R} \quad ⑮$$

联立⑦⑧⑬⑭⑮式得
$$f=(B_0lv_0+kS)\frac{B_0l}{R} \quad ⑯$$

考点伸展

1. 原题中，若在 t_0 时刻恰好以速度 v_0 越过 MN，且右侧的磁场方向改为垂直纸面向外，大小仍为 B_0，并撤去外力 F，试分析金属棒可能的运动情况，试定性画出它的 $v-t$ 图象。

2. 2016 年上海物理卷第 33 题

如图 10-2-1 所示，一关于 y 轴对称的导体轨道位于水平面内，磁感应强度为 B 的匀强磁场与平面垂直。一足够长，质量为 m 的直导体棒沿 x 轴方向置于轨道上，在外力 F 作用下从原点由静止开始沿 y 轴正方向做加速度为 a 的匀加速直线运动，运动时棒与 x 轴始终平行。棒单位长度的电阻 ρ，与电阻不计的轨道接触良好，运动中产生的热功率随棒位置变化规律为 $P=ky^{3/2}$(SI)。求：

(1) 导体轨道的曲线方程 $y=f(x)$；

(2) 棒在运动过程中受到的安培力 F_A 随 y 的变化关系；

(3) 棒从 $y=0$ 运动到 $y=L$ 过程中外力 F 的功。

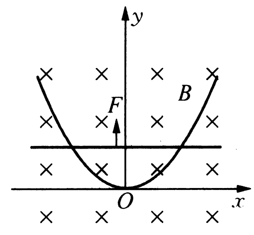


图 10-2-1

思路点拨

本题属于电磁感应中的力电综合问题，考查学生对于法拉第电磁感应定律、安培力、动能定理、热功率的掌握情况。(1)导体棒切割磁感线相当于电源，在计算电动势时要注意确定导体棒切割的有效长度，解题的关键在于利用题干所给“热功率随棒位置变化规律为 $P=ky^{3/2}$”的信息；(2)在只有动生电动势的情况下，导体棒克服安培力所做的功等于电路中产生的焦耳热，利用此结论可推导安培力 F_A 与 y 的关系；(3)导体棒做匀加速直线运动，外力 F 是变力，要通过动能定理间接地求变力做功。

满分解答

解：(1) 设棒运动到某一位置时与轨道接触点的坐标为($\pm x$, y)，则电路中导体棒因切割而产生的感应电动势 $E=Blv=2Bxv$。

$$\text{热功率 } P=\frac{E^2}{R}=\frac{4B^2x^2v^2}{R}=ky^{3/2} \qquad ①$$

棒做匀加速直线运动，有 $v^2=2ay$。

棒切割磁感线的有效长度对应的电阻 $R=2\rho x$，代入①式可得轨道曲线方程为 $y=\left(\frac{4aB^2}{k\rho}\right)^2x^2$。

(2) 安培力 $F_A=BIl=\frac{4B^2x^2v}{R}=\frac{2B^2x}{\rho}\sqrt{2ay}$，以轨道曲线方程代入可得 $F_A=\frac{k}{\sqrt{2a}}y$。

(3) 对导体棒应用动能定理有 $W-|W_A|=\frac{1}{2}mv^2-0$。克服安培力做功 $|W_A|=\overline{F}_A\cdot y$，因 F_A 与 y 成正比，故 $|W_A|=\frac{F_m}{2}\cdot y=\frac{k}{2\sqrt{2a}}L^2$。

棒在 $y=L$ 处动能 $\frac{1}{2}mv^2=maL$。所以外力做功为 $W=\frac{k}{2\sqrt{2a}}L^2+maL$。

考点伸展

2. 原题情景下求：棒从 $y=0$ 运动到 $y=L$ 的过程中，通过导体棒某个截面的电量 q。

3. 2019 年 4 月浙江选考卷第 22 题

如图 10－3－1 所示，倾角 $\theta=37°$、间距 $l=0.1\,\text{m}$ 的足够长金属导轨底端接有阻值 $R=0.1\,\Omega$ 的电阻，质量 $m=0.1\,\text{kg}$ 的金属棒 ab 垂直导轨放置，与导轨间的动摩擦因数 $\mu=0.45$。建立原点位于底端、方向沿导轨向上的坐标轴 x。在 $0.2\,\text{m}\leqslant x\leqslant 0.8\,\text{m}$ 区间有垂直导轨平面向上的匀强磁场。从 $t=0$ 时刻起，棒 ab 在沿 x 轴正方向的外力 F 作用下从 $x=0$ 处由静止开始沿斜面向上运动，其速度与位移 x 满足 $v=kx$（可导出 $a=kv$），$k=5\,\text{s}^{-1}$。当棒 ab 运动至 $x_1=0.2\,\text{m}$ 处时，电阻 R 消耗的电功率 $P=0.12\,\text{W}$，运动至 $x_2=0.8\,\text{m}$ 处时撤去外力 F，此后棒 ab 将继续运动，最终返回至 $x=0$ 处。棒 ab 始终保持与导轨垂直，不计其他电阻，求：（提示：可以用 F-x 图象下的“面积”代表力 F 做的功）

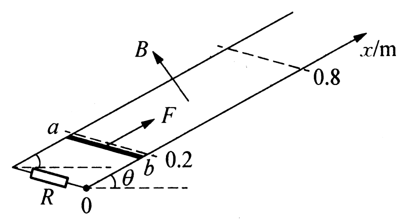


图 10－3－1

（1）磁感应强度 B 的大小；

（2）外力 F 随位移 x 变化的关系式；

（3）在棒 ab 整个运动过程中，电阻 R 产生的焦耳热 Q。

思路点拨

本题在电磁感应的背景下，要求综合运用受力分析、牛顿运动定律、动能定理等方法和规律，解决电磁感应、动力学、能量等问题，考查了力、能量的观念和分析复杂问题的素养。

本题情景复杂，斜面上的区域分为无磁场和有磁场两部分，导体棒先经过无磁场区域，再经过有磁场区域，最后出磁场后还要上升，更有再返回到出发点等多个过程，题目中存在两个难点：第一，导体棒的运动不是学生熟悉的匀变速运动，而是一种新的运动形式；第二，导体棒受到的拉力和安培力都是变力，要进行变力做功的求解。

（1）已知 $x_1=0.2\,\text{m}$ 处时，电阻 R 消耗的电功率 $P=\dfrac{E^2}{R}$，其中 $E=Blv$。根据题给信息 $v=kx$ 可算出此时导体棒的速度，代入即可得到磁感应强度的大小。

（2）由题给信息 $v=kx$（可导出 $a=kv$）得到 a 与 x 的关系。对导体棒进行受力分析，在无磁场区域，根据牛顿第二定律可得该区域内拉力 F 随位移 x 变化的规律。在有磁场区域，导体棒还受安培力的作用，安培力与 v 成正比，即也与 x 成正比，同理根据牛顿第二定律可得到该区域内拉力 F 随位移 x 变化的规律。

（3）导体棒上升阶段和下降阶段 R 上都能产生焦耳热。上升阶段 R 产生的焦耳热与克服安培力做的功等大，由于安培力与 x 成正比，利用 F_A-x 图象下的“面积”可求解安培力做的功。下降阶段拉力已经撤去，导体棒的运动已非 $v=kx$，需要重新判断。需要求解导体棒回到磁场上边界时的速度。要特别注意上升和下降过程中摩擦力方向的变化。分析导体棒返回磁场上边界时的受力情况，可发现导体棒受力平衡，因此导体棒匀速通过磁场区域，安培力是恒力。计算克服安培力做的功，即为下降阶段产生的焦耳热。

满分解答

(1) 由 $P=\frac{E^2}{R}$，$E=Blv$，解得 $B=\sqrt{\frac{PR}{(lv)^2}}=\frac{\sqrt{30}}{5}$ T。

(2) 无磁场区间：$0\leqslant x<0.2$ m，$a=5v=25x$，由牛顿第二定律有

$$F-\mu mg\cos\theta-mg\sin\theta=ma$$

代入数据可得 $F=0.96+2.5x$。

有磁场区间：$0.2\leqslant x\leqslant 0.8$ m，安培力 $F_A=\frac{(Bl)^2v}{R}=0.6x$，由牛顿第二定律有

$$F-\mu mg\cos\theta-mg\sin\theta-F_A=ma$$

可得 $F=0.96+2.5x+0.6x=0.96+3.1x$。

(3) 导体棒在 $x_1=0.2$ m 到 $x_2=0.8$ m 区间运动时，安培力 $F_A=0.6x$，作出 F_A-x 图象，图象与横轴包围的梯形面积即为克服安培力做的功，有

$$W_{A1}=\frac{(x_2-x_1)}{2}\times(0.6x_1+0.6x_2)=0.18\ \text{J}$$

撤去外力后，棒 ab 上升的最大距离为 s，再次进入磁场时的速度为 v'，由动能定理有

$$-(mg\sin\theta+\mu mg\cos\theta)s=0-\frac{1}{2}mv^2$$

$$(mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta)s=\frac{1}{2}mv'^2$$

解得 $v'=2$ m/s。

由于 $mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta-\frac{(Bl)^2v'}{R}=0$，故棒再次进入磁场后做匀速运动。

下降过程中克服安培力做功

$$W_{A2}=\frac{(Bl)^2v'}{R}(x_2-x_1)=0.144\ \text{J}$$

$$Q=W_{A1}+W_{A2}=0.324\ \text{J}$$

考点伸展

3. 原题中，试分别计算导体棒在上升和下降过程中，通过电阻 R 的电量。

4. 2019 年天津理综卷第 11 题

如图 10-4-1 所示，固定在水平面上间距为 l 的两条平行光滑金属导轨，垂直于导轨放置的两根金属棒 MN 和 PQ 长度也为 l、电阻均为 R，两棒与导轨始终接触良好。M、N 两端通过开关 S 与电阻为 R 的单匝金属线圈相连，线圈内存在竖直向下均匀增加的磁场，磁通量变化率为常量 k。图中虚线右侧有垂直于导轨平面向下的匀强磁场，磁感应强度大小为 B。PQ 的质量为 m，金属导轨足够长，电阻忽略不计。

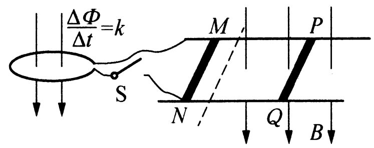


图 10-4-1

(1) 闭合 S，若使 PQ 保持静止，需在其上加多大的水平恒力 F，并指出其方向；

(2) 断开 S，PQ 在上述恒力作用下，由静止开始到速度大小为 v 的加速过程中流过 PQ 的电荷量为 q，求该过程安培力做的功 W。

思路点拨

1. 由法拉第电磁感应定律可知左边的单匝线圈处在变化的磁场中，线圈中就会感应出电动势，而在开关 S 闭合的情况下右边的两根棒就与线圈构成了一个电路。然而右边的 PQ 棒处在恒定的磁场中，所以棒就受到安培力的作用。因为轨道是光滑的，所以要保持 PQ 棒静止就需要施加一个与安培力等大反向的力，故可求得所加水平恒定的外力 F 的大小和方向。

2. 在电磁感应问题中流过回路的电量 $q=n\frac{\Delta\Phi}{R}$(其中 n 为线圈匝数，$\Delta\Phi$ 为磁通量变化量，R 为回路中的总电阻)，因此在电量 q 已知的情况下可以计算出 PQ 棒运动的位移 x。对 PQ 棒从静止开始到速度大小为 v 的过程中由动能定理求得安培力做的功 W。

满分解答

(1) 设线圈中的感应电动势为 E，由法拉第电磁感应定律 $E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，有

$$E=k \quad ①$$

设 PQ 与 MN 并联的电阻为 $R_{并}$，有

$$R_{并}=\frac{R}{2} \quad ②$$

闭合 S 时，设线圈中的电流为 I，根据闭合电路欧姆定律得

$$I=\frac{E}{R_{并}+R} \quad ③$$

设 PQ 中的电流为 I_{PQ}，有

$$I_{PQ}=\frac{1}{2}I \quad ④$$

设 PQ 受到的安培力为 $F_{安}$，有

$$F_{安}=BI_{PQ}l \tag{5}$$

要保持 PQ 静止，由受力平衡有

$$F=F_{安} \tag{6}$$

联立①②③④⑤⑥式得

$$F=\frac{Bkl}{3R} \tag{7}$$

方向水平向右。

(2) 设 PQ 由静止开始到速度大小为 v 的加速过程中，PQ 运动的位移为 x，所用时间为 Δt，回路中的磁通量变化为 $\Delta\Phi$，平均感应电动势为 $\bar{E}$，有

$$\bar{E}=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{8}$$

其中

$$\Delta\Phi=Blx \tag{9}$$

设 PQ 中的平均电流为 $\bar{I}$，有

$$\bar{I}=\frac{\bar{E}}{2R} \tag{10}$$

根据电流的定义得

$$\bar{I}=\frac{q}{\Delta t} \tag{11}$$

由动能定理，有

$$Fx+W=\frac{1}{2}mv^2-0 \tag{12}$$

联立⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬式得

$$W=\frac{1}{2}mv^2-\frac{2}{3}kq \tag{13}$$

考点伸展

4. 原题中，其他条件均不变，求第(2)问中该过程 PQ 棒的运动时间。

5. 2017年北京理综卷第24题

发电机和电动机具有装置上的类似性，源于它们机理上的类似性。直流发电机和直流电动机的工作原理可以简化为如图10-5-1、图10-5-2所示的情景。

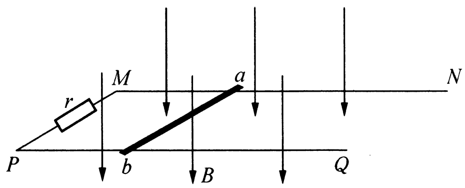


图 10-5-1

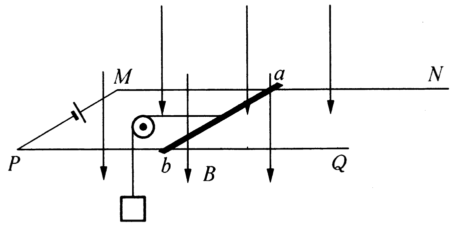


图 10-5-2

在竖直向下的磁感应强度为 B 的匀强磁场中，两根光滑平行金属轨道 MN、PQ 固定在水平面内，相距为 L，电阻不计。电阻为 R 的金属导体棒 ab 垂直于 MN、PQ 放在轨道上，与轨道接触良好，以速度 v(v 平行于 MN)向右做匀速运动。

图10-5-1轨道端点 M、P 间接有阻值为 r 的电阻，导体棒 ab 受到水平向右的外力作用。图10-5-2轨道端点 M、P 间接有直流电源，导体棒 ab 通过滑轮匀速提升重物，电路中的电流为 I。

(1) 求在 Δt 时间内，图10-5-1"发电机"产生的电能和图10-5-2"电动机"输出的机械能。

(2) 从微观角度看，导体棒 ab 中的自由电荷所受洛伦兹力在上述能量转化中起着重要作用。为了方便，可认为导体棒中的自由电荷为正电荷。

a. 请在图10-5-3(图10-5-1的导体棒 ab)、图10-5-4(图10-5-2的导体棒 ab)中，分别画出自由电荷所受洛伦兹力的示意图。

b. 我们知道，洛伦兹力对运动电荷不做功。那么，导体棒 ab 中的自由电荷所受洛伦兹力是如何在能量转化过程中起到作用的呢？请以图10-5-2中"电动机"为例，通过计算分析说明。

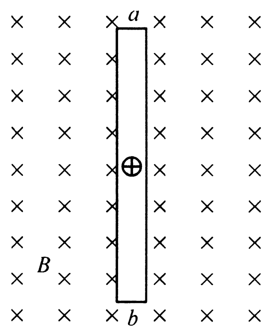


图 10-5-3

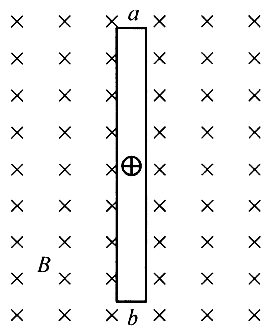


图 10-5-4

思路点拨

(1) 图 10－5－1 中“发电机”产生的电动势恒定不变，电能既可用克服安培力的功进行量度，也可用公式 $E_{电} = \frac{E^2}{R+r}\Delta t$ 直接求解。图 10－5－2 中“电动机”通过安培力做正功实现电能向重物机械能的转化。

(2) a. 分析自由电荷的运动方向是解答本小题的关键。图 10－5－3 中，导体棒 ab 向右切割磁感线产生感应电流，方向由 b 指向 a。棒内的正电荷相对纸面在向右运动的同时，又存在 $b\to a$ 方向的分速度。先用左手定则判断正电荷参与两个分运动所对应的洛伦兹力，再求合力即可。值得注意的是：图 10－5－4 中，在电源形成的电场作用下，棒中正电荷沿棒的分速度方向为 $a\to b$。

b. 在 a 问作图的基础上，利用功的计算式及合力功等于各分力功的代数和的思想即可证明洛伦兹力不做功。功是能量转化的量度，洛伦兹力不做功，意味着洛伦兹力并不提供能量，而只是起到传递能量的作用，即通过洛伦兹力的一个分力做负功，阻碍自由电荷的定向移动，消耗电源的电能，通过另一个分力做等量的正功将电能转化为机械能。

满分解答

解：(1) 图 10－5－1 中，电路中的电流 $I_1 = \frac{BLv}{R+r}$；

棒 ab 受到的安培力 $F_1 = BI_1L$；

在 Δt 时间内，“发电机”产生的电能等于棒 ab 克服安培力做的功

$$E_{电} = F_1 \cdot v\Delta t = \frac{B^2L^2v^2\Delta t}{R+r}$$

图 10－5－2 中，棒 ab 受到的安培力 $F_2 = BIL$；

在 Δt 时间内，“电动机”输出的机械能等于安培力对棒 ab 做的功

$$E_{机} = F_2 \cdot v\Delta t = BILv\Delta t$$

(2) a. 图 10－5－3 中，棒 ab 向右运动，由左手定则可知其中的正电荷受到 $b\to a$ 方向的洛伦兹力，在该洛伦兹力作用下，正电荷沿导体棒运动形成感应电流，有沿 $b\to a$ 方向的分速度，对应受到向左的洛伦兹力作用；图 10－5－4 中，在电源形成的电场作用下，棒 ab 中的正电荷沿 $a\to b$ 方向运动，受到向右的洛伦兹力作用，该洛伦兹力使导体棒向右运动，正电荷具有向右的分速度，又受到沿$b\to a$方向的洛伦兹力作用，如图 10－5－5、图 10－5－6 所示。

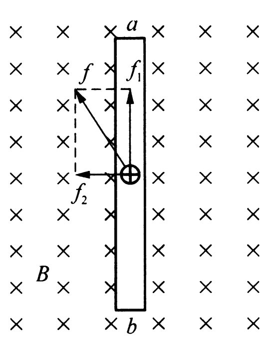


图 10－5－5

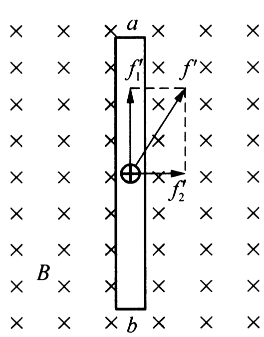


图 10－5－6

b. 如图 10－5－6 所示，设自由电荷的电荷量为 q，沿导体棒由 $a \to b$ 定向移动的速率为 u。当 ab 棒以速度 v 向右运动时，沿棒方向的洛伦兹力 $f_1' = qvB$，其做功为

$$W_1 = -f_1' \cdot u\Delta t = -qvBu\Delta t$$

垂直棒方向的洛伦兹力 $f_2' = quB$，其做功

$$W_2 = f_2' \cdot v\Delta t = quBv\Delta t$$

所以，$W_1 = -W_2$，即导体棒中一个自由电荷所受的洛伦兹力做的总功为零。

f_1'做负功，阻碍自由电荷的定向移动，宏观上表现为“反电动势”，电源克服 f_1'要消耗电能；f_2'做正功，宏观上表现为安培力做正功，使 ab 棒及重物的机械能增加。从能量转化的角度看，即电源的电能转化为等量的机械能，在此过程中洛伦兹力通过两个分力做功起到传递能量的作用。

考点伸展

5. 原题中若端点 M、P 间改接一电容为 C 的电容器，撤去导体棒 ab 上的外力，给导体棒一个向右的初速度 v_0，其他条件不变，如图 10－5－7 所示。求导体棒从开始运动到达到稳定状态时电容器带的电荷量。

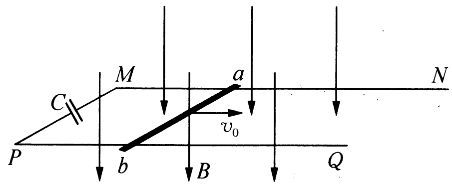


图 10－5－7

6. 2017年天津理综卷第12题

电磁轨道炮利用电流和磁场的作用使炮弹获得超高速度，其原理可用来研制新武器和航天运载器。电磁轨道炮示意如图10-6-1，图中直流电源电动势为E，电容器的电容为C。两根固定于水平面内的光滑平行金属导轨间距为l，电阻不计。炮弹可视为一质量为m、电阻为R的金属棒MN，垂直放在两导轨间处于静止状态，并与导轨良好接触。首先开关S接至1，使电容器完全充电。然后将S接至2，导轨间存在垂直于导轨平面、磁感应强度大小为B的匀强磁场（图中未画出），MN开始向右加速运动。当MN上的感应电动势与电容器两极板间的电压相等时，回路中电流为零，MN达到最大速度，之后离开导轨。问：

(1) 磁场的方向；

(2) MN刚开始运动时加速度a的大小；

(3) MN离开导轨后电容器上剩余的电荷量Q是多少。

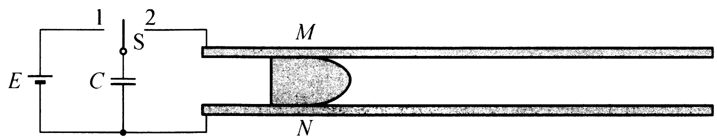


图10-6-1

思路点拨

本题是电磁感应与电路、力学知识的综合，解决这类题目的基本思路是对研究对象正确进行受力分析，弄清运动形式，然后依据相应规律求解，对于第三问，注意电流在变化，安培力在变化，可结合动量定理，通过平均电流，结合通过的电量进行求解。

(1) 根据通过MN电流的方向，结合左手定则得出磁场的方向。

(2) 根据欧姆定律得出MN刚开始运动时的电流，结合安培力公式，根据牛顿第二定律得出MN刚开始运动时加速度a的大小。

(3) 开关S接2后，MN开始向右加速运动，速度达到最大值v_{max}时，根据电动势和电荷量的关系，以及动量定理求出MN离开导轨后电容器上剩余的电荷量Q。

满分解答

解：(1) 电容器上端带正电，通过MN的电流方向向下，由于MN向右运动，根据左手定则知，磁场方向垂直于导轨平面向下。

(2) 电容器完全充电后，两极板间电压为E，当开关S接2时，电容器放电，设刚放电时流经MN的电流为I，有

$$I=\frac{E}{R} \quad ①$$

设MN受到的安培力为F，有

$$F=IlB \quad ②$$

由牛顿第二定律有

$$F=ma \quad ③$$

联立①②③式可得

$$a = \frac{BEl}{mR}$$ ④

（3）电容器放电前所带的电荷量

$$Q_1 = CE$$ ⑤

开关 S 接至 2 后，MN 开始向右加速运动，速度达到最大值 v_m 时，MN 上的感应电动势

$$E' = Blv_m$$ ⑥

最终电容器所带电荷量

$$Q_2 = CE'$$ ⑦

设在此过程中流过 MN 的平均电流为$\overline{I}$，MN 上受到的平均安培力

$$\overline{F} = B \cdot \overline{I} \cdot l$$ ⑧

由动量定理，有

$$\overline{F} \cdot \Delta t = mv_m - 0$$ ⑨

又

$$\overline{I} \cdot \Delta t = Q_1 - Q_2$$ ⑩

由⑤⑥⑦⑧⑨⑩式可得最终电容器所带电荷量

$$Q_2 = \frac{B^2 l^2 C^2 E}{B^2 l^2 C + m}$$ ⑪

考点伸展

6. 求原题中安培力对“炮弹”所做的功。

7. 2017 年上海物理卷第 20 题

如图 10-7-1 所示，光滑平行金属导轨间距为 L，与水平面夹角为 θ，两导轨上端用阻值为 R 的电阻相连，该装置处于磁感应强度为 B 的匀强磁场中，磁场方向垂直于导轨平面。质量为 m 的金属杆 ab 以沿导轨平面向上的初速度 v_0 从导轨底端开始运动，然后又返回到出发位置。在运动过程中，ab 与导轨垂直且接触良好，不计 ab 和导轨的电阻及空气阻力。

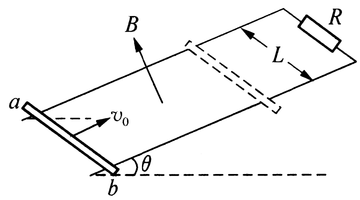


图 10-7-1

(1) 求 ab 开始运动时的加速度 a；

(2) 分析并说明 ab 在整个运动过程中速度、加速度的变化情况；

(3) 分析并比较 ab 上滑时间和下滑时间的长短。

思路点拨

理清力和运动的关系是解决本题的关键，力和运动通过加速度进行联系。对于杆 ab 速度、加速度的分析可以按下列步骤进行：(1)分析杆 ab 的受力；(2)由牛顿第二定律确定力和加速度的关系；(3)分析加速度与速度的方向关系，判断速度的大小变化规律；(4)判断安培力的变化→合力的变化→加速度的变化……如此循环。明确杆的运动情况，结合运动学知识便可定性分析并比较杆上滑和下滑时间的长短。

满分解答

解：(1) ab 开始运动时产生的感应电动势

$$E = BLv_0$$

回路中的感应电流 $$I = \frac{E}{R}$$

杆所受安培力 $$F = BIL = \frac{B^2L^2v_0}{R}$$

杆的受力情况如图 10-7-2 所示，由牛顿第二定律，有

$$mg\sin\theta + F = ma$$

得 $$a = g\sin\theta + \frac{B^2L^2v_0}{mR}$$

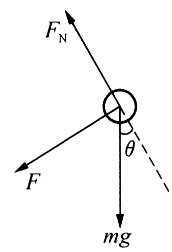


图 10-7-2

(2) 分析如下：

杆上滑时：杆受到的合力 $F_合 = mg\sin\theta + F$，与运动方向相反，杆做减速运动；随着速度的减小，F 也减小，合力减小，加速度减小，因此杆做加速度减小的变减速运动，到达一定高度后速度为零。

在最高点：杆的速度为零，加速度为 $g\sin\theta$，方向沿斜面向下。

杆下滑时：合力 $F_合 = mg\sin\theta - F$，与运动方向相同，杆做加速运动；随着速度的增加，F 也增大，合力减小，加速度减小，因此杆做初速为零、加速度减小的变加速运动。

(3) 分析如下：

杆上滑和下滑过程经过的位移大小相等。而上滑时杆的加速度大于 $g\sin\theta$，下滑时杆的加速度小于 $g\sin\theta$，因此上滑时的平均加速度大于下滑时的平均加速度，由运动学规律可知，上滑所需时间小于下滑所需时间。

考点伸展

7. 原题中若金属杆 ab 以沿导轨平面向上的初速度 v_0 从导轨底端开始运动，然后再返回到出发位置的总时间为 t，求杆下滑到出发位置时的速度大小。

8. 2018年天津理综卷第12题

真空管道超高速列车的动力系统是一种将电能直接转换成平动动能的装置。图10-8-1所示是某种动力系统的简化模型，图中粗实线表示固定在水平面上间距为 l 的两条平行光滑金属导轨，电阻忽略不计。ab 和 cd 是两根与导轨垂直，长度均为 l，电阻均为 R 的金属棒，通过绝缘材料固定在列车底部，并与导轨良好接触，其间距也为 l，列车的总质量为 m。列车启动前，ab、cd 处于磁感应强度为 B 的匀强磁场中，磁场方向垂直于导轨平面向下，如图10-8-1所示。为使列车启动，需在 M、N 间连接电动势为 E 的直流电源，电源内阻及导线电阻忽略不计，列车启动后电源自动关闭。

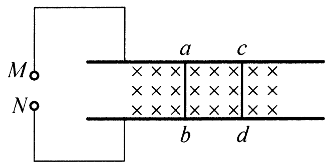


图10-8-1

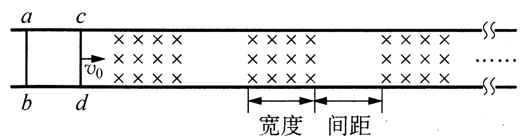


图10-8-2

(1) 要使列车向右运行，启动时图10-8-1中 M、N 哪个接电源正极，并简要说明理由；

(2) 求刚接通电源时列车加速度 a 的大小；

(3) 列车减速时，需在前方设置如图10-8-2所示的一系列磁感应强度为 B 的匀强磁场区域，磁场宽度和相邻磁场间距均大于 l。若某时刻列车的速度为 v_0，此时 ab、cd 均在无磁场区域，试讨论：要使列车停下来，前方至少需要多少块这样的有界磁场？

思路点拨

本题是电磁感应与电路、力学知识的综合，解决这类题目的基本思路是对研究对象正确进行受力分析，弄清运动形式，然后依据相应规律求解，对于第(3)问，注意电流在变化，安培力在变化，可结合动量定理，通过平均电流，根据通过的电量进行求解。

(1) 根据列车启动后向右运动，根据左手定则得出金属棒中的电流方向，从而确定 M、N 两处的电势的高低。

(2) 根据欧姆定律得出金属棒中的电流，结合安培力公式，由牛顿第二定律得出列车刚启动时加速度 a 的大小。

(3) 金属棒 ab、cd 组成的回路，在进入匀强磁场区域或离开磁场区域的过程中，产生感应电动势，安培力使列车不断减速，直至停下来。根据动量定理，由安培力获得冲量的次数得到有界磁场的块数。

满分解答

解：(1) 列车要向右运动，安培力方向应向右，根据左手定则，接通电源后，金属棒中电流方向由 a 到 b、由 c 到 d，故 M 接电源正极。

(2) 由题意，启动时 ab、cd 并联，设回路总电阻为 $R_{总}$，由电阻的串并联知识得

$$R_{总} = \frac{R}{2}$$ ①

设回路总电流为 I，根据电路欧姆定律有 $I_{总} = \frac{E}{R_{总}}$。 ②

设两根金属棒所受安培力之和为 F，有 $F = 2IlB$。 ③

根据牛顿第二定律有 $F = ma$。 ④

联立①②③④式得 $a = \frac{2BEl}{mR}$。 ⑤

(3) 设列车减速时，cd 进入磁场后经 Δt 时间 ab 恰好进入磁场，平均感应电动势为 E_1，由法拉第电磁感应定律有 $E_1 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$。 ⑥

此过程中穿过两金属棒与导轨所围回路的磁通量的变化为 $\Delta\Phi = Bl^2$。 ⑦

设回路中平均电流为 I'，由闭合电路欧姆定律有 $I' = \frac{E_1}{2R}$。 ⑧

通过 cd 棒的电量 $q = I'\Delta t = \frac{Bl^2}{2R}$。 ⑨

以向右为正方向，设 Δt 时间内 cd 受安培力冲量为 $I_{冲}$，有 $I_{冲} = -I'Bl\Delta t = -Bql$。 ⑩

同理可知，回路出磁场时 ab 受安培力冲量仍为上述值，设回路进出一块有界磁场区域安培力冲量为 I_0，有 $I_0 = 2I_{冲}$。 ⑪

设列车停下来受到的总冲量为 $I_{总}$，由动量定理有 $I_{总} = 0 - mv_0$。 ⑫

联立⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫式得 $\frac{I_{总}}{I_0} = \frac{mv_0R}{B^2l^3}$。 ⑬

讨论：若 $\frac{I_{总}}{I_0}$ 恰好为整数，设其为 n，则需设置 n 块有界磁场；若 $\frac{I_{总}}{I_0}$ 不是整数，设 $\frac{I_{总}}{I_0}$ 的整数部分为 N，则需设置 $N+1$ 块有界磁场。

考点伸展

8. 原题中若某时刻列车的速度为 v，此时 ab、cd 均在无磁场区域，求列车进出如图 10-8-2 所示的一块匀强磁场区域的过程中，回路所产生的焦耳热 Q。

9. 2018 年 4 月浙江选考卷第 23 题

如图 10－9－1 所示，在竖直平面内建立 xOy 坐标系，在 $0\leqslant x\leqslant 0.65$ m、$y\leqslant 0.40$ m 范围内存在一具有理想边界，方向垂直纸面向里的匀强磁场区域。一边长 $l=0.10$ m、质量 $m=0.02$ kg、电阻 $R=0.40\ \Omega$ 的匀质正方形刚性导线框 $abcd$ 处于图示位置，其中心的坐标为(0, 0.65 m)。现将线框以初速度 $v_0=2.0$ m/s 水平向右抛出，线框在进入磁场过程中速度保持不变，然后在磁场中运动，最后从磁场右边界离开磁场区域，完成运动全过程。线框在全过程中始终处于 xOy 平面内、其 ab 边与 x 轴保持平行，空气阻力不计，重力加速度 g 取 $10\ \text{m/s}^2$。求：

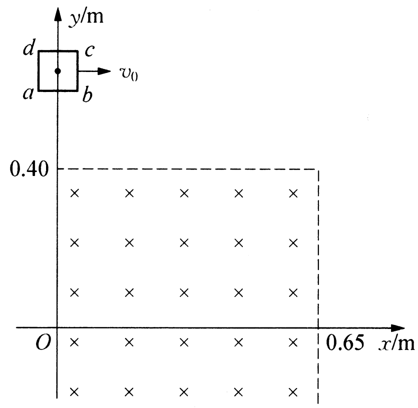


图 10－9－1

(1) 磁感应强度 B 的大小；

(2) 线框在全过程中产生的焦耳热 Q；

(3) 在全过程中，cb 两端的电势差 U_{cb} 与线框中心位置的 x 坐标的函数关系。

思路点拨

1. 由线框在进入磁场过程中速度保持不变，可知该过程中线框受到的合力为零，由于进入磁场区域过程中，线框左、右两边受到的安培力的合力为零，故线框沿竖直方向的合力也必为零，即 $mg=\dfrac{B^2l^2v_y}{R}$，v_y 为线框刚进入磁场区域时沿竖直方向的速度分量。

2. 线框在离开磁场区域右边界的过程中，线框上、下两边受到的安培力的合力为零，故线框从完全进入磁场区域到最终离开磁场区域过程中，线框在竖直方向上的加速度恒为 g；线框在离开磁场区域右边界的过程中，线框的 ad 边切割磁感线，受到水平向左的安培力的作用，线框做减速运动，由水平方向动量定理可列式 $-qBl=m(v_x-v_0)$，由法拉第电磁感应定律和电流的定义式可知该过程流过线框横截面的电荷量 $q=\dfrac{Bl^2}{R}$，结合两式可得线框离开磁场区域后的水平速度 v_x。

3. 由线框匀速进入磁场区域可知，该过程线框产生的焦耳热等于线框重力势能的改变；线框离开磁场区域过程中，在竖直方向上重力做功使其竖直分速度增大，在水平方向上由于受安培力作用，水平分速度减小，减小的动能即为线框离开磁场区域过程中产生的焦耳热。

4. 线框在进入磁场区域过程中，线框的 cb 边切割磁感线同时线框中又有感应电流产生，则 $U_{cb}=E_{cb}-I\dfrac{R}{4}$，由于 cb 边进入磁场区域的长度逐渐增大，需注意 E_{cb} 与线框中心位置的 x 坐标的关系式；线框在磁场中运动时，cb 边切割磁感线但线框中没有感应电流流过，则 $U_{cb}=E_{cb}$；线框在离开磁场区域过程中，cb 边不切割磁感线但线框中有感应电流流过，则 $U_{cb}=I\dfrac{R}{4}$，由于线框离开磁场过程中，水平速度在减小，即回路中的感应电流 I 在减小，需注意 I 与 x 的关系式。

满分解答

解：(1) 线框从水平抛出到刚进入磁场区域过程，线框做平抛运动，其中心下降$\Delta y_1=0.20\ \text{m}$，进入磁场区域时，线框沿竖直方向的分速度

$$v_{y_1}=\sqrt{2g\Delta y_1}=2.0\ \text{m/s}$$

线框进入磁场过程中，线框中的感应电流

$$I_1=\frac{E_1}{R}=\frac{Blv_{y1}}{R}$$

由于线框在进入磁场过程中速度保持不变，即线框受到的合力为零

$$mg=I_1Bl=\frac{B^2l^2v_{y1}}{R}$$

化简后代入得磁感应强度

$$B=\sqrt{\frac{mgR}{l^2v_{y1}}}=2.0\ \text{T}$$

(2) 由于线框在进入磁场过程中动能保持不变，故该过程中线框产生的焦耳热等于线框重力势能的减小

$$Q_1=mgl=0.02\ \text{J}$$

线框在离开磁场区域右边界的过程中，沿竖直方向受到的安培力的合力为零，故沿竖直方向做加速度为 g 的匀加速运动，线框在水平方向上受安培力作用做减速运动，对线框研究，由水平方向动量定理可列式

$$F\Delta t=m\Delta v\text{，即}-qBl=m(v_x-v_0)$$

式中 q 为线框出磁场过程中流过线框横截面的电荷量，由法拉第电磁感应定律可得

$$q=\frac{Bl^2}{R}$$

代入上式可得线框离开磁场区域时的水平速度

$$v_x=v_0-\frac{B^2l^3}{mR}=1.5\ \text{m/s}$$

线框在离开磁场区域过程中，由于受安培力作用而产生的焦耳热为

$$Q_2=\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}mv_x^2=0.0175\ \text{J}$$

线框在全过程中产生的焦耳热为

$$Q=Q_1+Q_2=0.0375\ \text{J}$$

(3) 分段讨论 cb 两端的电势差 U_{cb} 与线框中心位置的 x 坐标的函数关系。

i) 进入磁场区域前：线框做平抛运动，经历时间$t_1=\sqrt{\frac{2\Delta y_1}{g}}=0.2\ \text{s}$，水平位移 $\Delta x_1=v_0t_1=$

0.40 m，即当

$$0 \leqslant x \leqslant 0.40\text{ m 时}, U_{cb} = 0$$

ii）进入磁场区域过程：线框做匀速直线运动，水平位移 $\Delta x_2 = l = 0.10\text{ m}$，线框的 cb 边切割磁感线同时线框中又有感应电流产生，其中 cb 边切割磁感线产生感应电动势的方向如图 10-9-2 所示，大小为

$$E_{cb} = B\Delta y_2 v_0 = B \cdot v_{y1} \frac{x-0.40}{v_0} \cdot v_0 = 4 \times (x-0.40)\text{V}$$

线框中的感应电流大小为

$$I = \frac{Blv_{y1}}{R}$$

由闭合电路欧姆定律可得

$$U_{cb} = E_{cb} - I\frac{R}{4} = (4x-1.60-0.10)\text{V} = (4x-1.70)\text{V}$$

即当 $0.40\text{ m} < x \leqslant 0.50\text{ m}$ 时，$U_{cb} = (4x-1.70)\text{V}$。

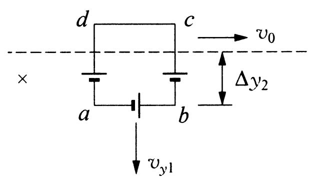


图 10-9-2

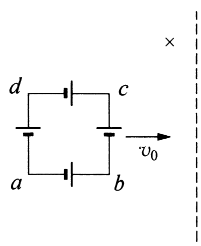


图 10-9-3

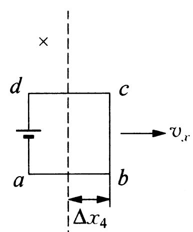


图 10-9-4

iii）在磁场中运动过程：线框沿水平方向做匀速直线运动，当线框沿水平方向发生位移 $\Delta x_3 = (0.60-0.50)\text{m} = 0.10\text{ m}$ 时，线框将要离开磁场区域，线框在磁场中运动时，cb 边切割磁感线产生感应电动势的方向如图 10-9-3 所示，该过程线框中没有感应电流产生，故

$$U_{cb} = E_{cb} = Blv_0 = 0.4\text{ V}$$

即当 $0.50\text{ m} < x \leqslant 0.60\text{ m}$ 时，$U_{cb} = 0.4\text{ V}$。

iv）离开磁场区域过程：cb 边不切割磁感线但线框中有感应电流流过，如图 10-9-4 所示，当线框离开磁场区域 Δx_4 位移时，线框的水平速度为 v_x，由水平方向动量定理可列式

$$-qBl = m(v_x - v_0)$$

式中 q 为该过程流过线框横截面的电荷量

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{Bl\Delta x_4}{R} = \frac{Bl(x-0.6)}{R}$$

代入上式得 $v_x = v_0 - \dfrac{B^2l^2(x-0.6)}{mR}$；

由欧姆定律可得 $U_{cb} = I\dfrac{R}{4} = \dfrac{Blv_x}{R} \cdot \dfrac{R}{4} = \dfrac{Bl}{4}\left[v_0 - \dfrac{B^2l^2(x-0.6)}{mR}\right] = \dfrac{1-x}{4}\text{V}$。

即当 $0.60\ \text{m}<x\leqslant 0.70\ \text{m}$ 时，$U_{cb}=\dfrac{1-x}{4}\ \text{V}$。

综上分析：在全过程中，cb 两端的电势差 U_{cb} 与线框中心位置的 x 坐标的函数关系为：当 $0\leqslant x\leqslant 0.40\ \text{m}$ 时，$U_{cb}=0$；

当 $0.40\ \text{m}<x\leqslant 0.50\ \text{m}$ 时，$U_{cb}=(4x-1.70)\text{V}$；

当 $0.50\ \text{m}<x\leqslant 0.60\ \text{m}$ 时，$U_{cb}=0.4\ \text{V}$；

当 $0.60\ \text{m}<x\leqslant 0.70\ \text{m}$ 时，$U_{cb}=\dfrac{1-x}{4}\ \text{V}$。

考点伸展

9. 如图 10-9-5 所示，在竖直平面内建立 xOy 坐标系，在 $0\leqslant x\leqslant 0.65\ \text{m}$、$0.70\ \text{m}\leqslant x\leqslant 0.75\ \text{m}$、$0.80\ \text{m}\leqslant x\leqslant 0.85\ \text{m}$……（每隔 0.05 m 分布有宽为 0.05 m 的磁场），$y\leqslant 0.40\ \text{m}$ 范围内存在一具有理想边界，方向垂直纸面向里的匀强磁场区域。一边长 $l=0.10\ \text{m}$、质量 $m=0.02\ \text{kg}$、电阻 $R=0.40\ \Omega$ 的匀质正方形刚性导线框 $abcd$ 处于图示位置，其中心的坐标为 $(0,\ 0.65\ \text{m})$。现将线框以初速度 $v_0=2.0\ \text{m/s}$ 水平向右抛出，线框在进入磁场过程中的机械能与线框中心位置的 y 坐标呈线性关系，然后在磁场中运动，从磁场右边界离开磁场区域后又进入右边的宽为 0.10 m 的磁场区域，之后再离开、进入……，如此运动。线框在全过程中始终处于 xOy 平面内、其 ab 边与 x 轴保持平行，规定 $y=0$ 处为零势能面，空气阻力不计，重力加速度 g 取 $10\ \text{m/s}^2$。

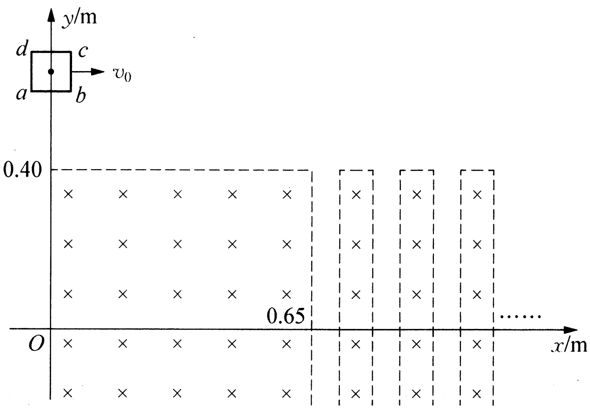


图 10-9-5

(1) 当线框中心位置的 x 坐标为 0.60 m时，求其中心位置的 y 坐标；

(2) 当线框中心位置的 x 坐标为 0.85 m时，求线框的水平速度 v_x；

(3) 判断线框沿水平方向的速度能否减到零，若能则求出水平速度减到零时其中心位置的 x 坐标，若不能则求出线框水平速度的最终值。

第四部分
物理实验

专题十一　力学实验

1. 2019 年全国Ⅰ卷第 22 题

某小组利用打点计时器对物块沿倾斜的长木板加速下滑时的运动进行研究。物块拖动纸带下滑，打出的纸带一部分如图 11-1-1 所示。已知打点计时器所用交流电的频率为 50 Hz，纸带上标出的每两个相邻点之间还有 4 个打出的点未画出。在 ABCDE 五个点中，打点计时器最先打出的是________点，在打出 C 点时物块的速度大小为________m/s（保留 3 位有效数字）；物块下滑的加速度大小为________m/s^2（保留 2 位有效数字）。

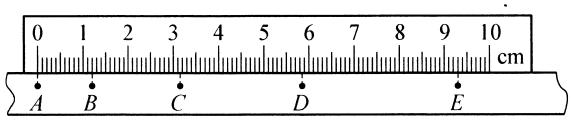


图 11-1-1

思路点拨

1. 刻度尺的读数：最小分度为 1 mm，应估读到 mm 的下一位。

2. 确定时间：交流电频率为 50 Hz，打点周期为 0.02 s，注意打出的自然点（打点）与人为选取的计数点之间的区别与联系。若每五个点取一个计数点（相邻两点间有 4 个点未画出），则计数点间的时间间隔 $T=0.1$ s。

3. 求解瞬时速度：利用做匀变速直线运动的物体在一段时间内的平均速度等于中间时刻的瞬时速度。

4. 求解加速度：

① 根据加速度的定义式求解：$a=\dfrac{\Delta v}{\Delta t}$。

② 用逐差法求解：由 $x_4-x_1=3a_1T^2$、$x_5-x_2=3a_2T^2$、$x_6-x_3=3a_3T^2$，求得三个加速度，取其平均值，即 $\bar{a}=\dfrac{a_1+a_2+a_3}{3}=\dfrac{(x_4+x_5+x_6)-(x_1+x_2+x_3)}{9T^2}$。

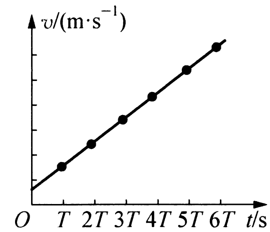


图 11-1-2

③ 利用 $v-t$ 图象求解：求出各点的瞬时速度，画出如图 11-1-2 所示的 $v-t$ 图线，图线的斜率等于加速度 a。

分析与解答

物块沿倾斜长木板做匀加速直线运动，对应纸带上的点迹，从 A 到 E，间隔越来越大，可知，物块跟纸带的左端相连，纸带上最先打出的是 A 点；在打点计时器打 C 点瞬间，物块的速度 $v_C=\dfrac{x_{BD}}{2T}=\dfrac{4.65\times10^{-2}}{2\times0.1}$ m/s $=0.233$ m/s；根据逐差法可知，物块下滑的加速度 $a=\dfrac{x_{CE}-x_{AC}}{4T^2}=$

$\frac{(6.15-3.15)\times10^{-2}}{4\times0.1^2}$ m/s^2 = 0.75 m/s^2。

答案：(1) A　(2) 0.233　(3) 0.75

考点伸展

1.（2018年北京理综卷）用图11-1-3所示的实验装置研究小车速度随时间变化的规律。

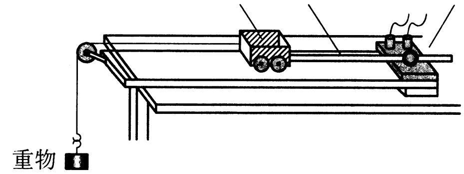


图 11-1-3

主要实验步骤如下：

a. 安装好实验器材。接通电源后，让拖着纸带的小车沿长木板运动，重复几次。

b. 选出一条点迹清晰的纸带，找一个合适的点当作计时起点 $O(t=0)$，然后每隔相同的时间间隔 T 选取一个计数点，如图11-1-4中 A、B、C、D、E、F…… 所示。

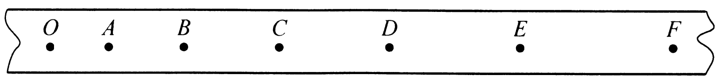


图 11-1-4

c. 通过测量、计算可以得到在打 A、B、C、D、E……点时小车的速度，分别记作 v_1、v_2、v_3、v_4、v_5……

d. 以速度 v 为纵轴、时间 t 为横轴建立直角坐标系，在坐标纸上描点，如图11-1-5所示。

结合上述实验步骤，请你完成下列任务：

(1) 在下列仪器和器材中，还需要使用的有________和________（填选项前的字母）。

A．电压合适的 50 Hz 交流电源

B．电压可调的直流电源

C．刻度尺

D．秒表

E．天平（含砝码）

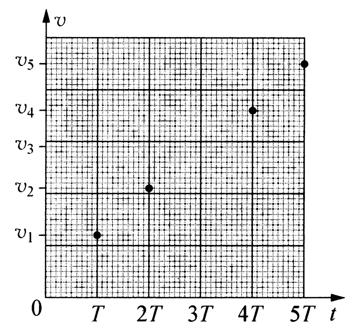


图 11-1-5

(2) 在图11-1-5中已标出计数点 A、B、D、E 对应的坐标点，请在该图中标出计数点 C 对应的坐标点，并画出 $v-t$ 图象。

(3) 观察 $v-t$ 图象，可以判断小车做匀变速直线运动，其依据是________。$v-t$ 图象斜率的物理意义是________。

(4) 描绘 $v-t$ 图象前，还不知道小车是否做匀变速直线运动。用平均速度 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 表示各计数点的瞬时速度，从理论上讲，对 Δt 的要求是________（选填“越小越好”或“与大小无关”）；从实验的角度看，选取的 Δx 大小与速度测量的误差________（选填“有关”或“无关”）。

(5) 早在16世纪末，伽利略就猜想落体运动的速度应该是均匀变化的。当时只能靠滴水计时，为此他设计了如图11-1-6所示的“斜面实验”，反复做了上百次，验证了他的猜想。请你结合匀变速直线运动的知识，分析说明如何利用伽利略“斜面实验”检验小球的速度是随时间均匀变化的。

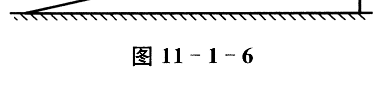


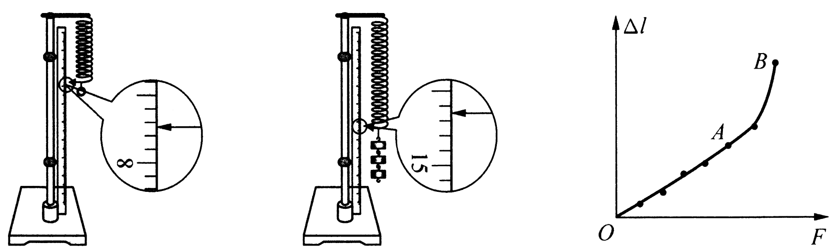
图 11-1-6

2. 2015 年福建理综卷第 19 题

某同学做“探究弹力和弹簧伸长量的关系”的实验。

① 图 11－2－1 甲所示是不挂钩码时弹簧下端指针所指的标尺刻度，其示数为 7.73 cm；图 11－2－1 乙所示是在弹簧下端悬挂钩码后指针所指的标尺刻度，此时弹簧的伸长量 Δl 为__________cm；

② 本实验通过在弹簧下端悬挂钩码的方法来改变弹簧的弹力，关于此操作，下列选项中规范的做法是__________；(填选项前的字母)



甲　　　　乙　　　　丙

图 11－2－1

A. 逐一增挂钩码，记下每增加一只钩码后指针所指的标尺刻度和对应的钩码总重

B. 随意增减钩码，记下增减钩码后指针所指的标尺刻度和对应的钩码总重

③ 图 11－2－1 丙是该同学所描绘的弹簧的伸长量 Δl 与弹力 F 的关系图线，图线的 AB 段明显偏离直线 OA，造成这种现象的主要原因是____________________。

思路点拨

1. 明确弹簧伸长量 Δl 的含义：伸长量 Δl 为弹簧下端悬挂钩码后指针所指的标尺刻度与不挂钩码时弹簧下端指针所指的标尺刻度的差值；读取标尺刻度时注意：①标尺每一小格表示的长度，②标尺刻度数顺序由上向下还是由下向上排列。

2. 本实验是通过在弹簧下端悬挂钩码的方法来改变弹簧的弹力，操作时应逐一增加所挂钩码，若是随意增减钩码，不仅使作图不方便，而且有可能会超出弹簧的弹性形变范围。

3. 利用 $\Delta l-F$ 图象来描述弹力和弹簧伸长量的关系，图象中的 OA 段说明了弹力 F 与弹簧的伸长量 Δl 成正比，而图线的 AB 段明显偏离直线 OA，说明此时弹力已超出弹簧的弹性形变范围。

分析与解答

① 由图 11－2－1 乙可读出刻度尺的读数为 14.66 cm，所以弹簧的伸长量 $\Delta l = 14.66\ \text{cm} - 7.73\ \text{cm} = 6.93\ \text{cm}$。

② 改变弹力时应逐一增挂钩码，选项 A 正确。

③ 图线的 AB 段明显偏离直线 OA，造成这种现象的主要原因是钩码的重力已超出弹簧弹

性形变范围。

答案：① 6.93　② A　③ 钩码重力超过弹簧弹性形变范围

考点伸展

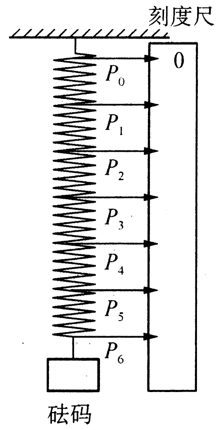


图 11－2－2

2.（2014 年全国理综Ⅱ卷第 23 题）某实验小组探究弹簧的劲度系数 k 与其长度（圈数）的关系。实验装置如图 11－2－2 所示：一均匀长弹簧竖直悬挂，7 个指针 P_0、P_1、P_2、P_3、P_4、P_5、P_6 分别固定在弹簧上距悬点 0、10、20、30、40、50、60 圈处；通过旁边竖直放置的刻度尺，可以读出指针的位置，P_0 指向 0 刻度。设弹簧下端未挂重物时，各指针的位置记为 x_0；挂有质量为 0.100 kg 的砝码时，各指针的位置记为 x。测量结果及部分计算结果如下表所示（n 为弹簧的圈数，重力加速度取 9.80 m/s^2）。已知实验所用弹簧总圈数为 60，整个弹簧的自由长度为 11.88 cm。

（1）将表中数据补充完整：①________；②________。

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
x_0/cm	2.04	4.06	6.06	8.05	10.03	12.01
x/cm	2.64	5.26	7.81	10.30	12.93	15.41
n	10	20	30	40	50	60
k/(N/m)	163	①	56.0	43.6	33.8	28.8
$\frac{1}{k}$/(m/N)	0.0061	②	0.0179	0.0229	0.0296	0.0347

（2）以 n 为横坐标，$\frac{1}{k}$ 为纵坐标，在图 11－2－3 给出的坐标纸上画出 $\frac{1}{k}-n$ 图象。

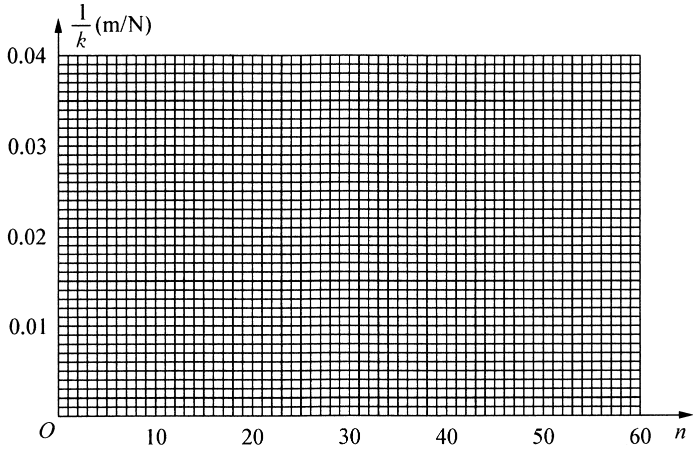


图 11－2－3

（3）图 11－2－3 中画出的直线可近似认为通过原点。若从实验中所用的弹簧截取圈数为 n 的一段弹簧，该弹簧的劲度系数 k 与其圈数 n 的关系的表达式为 $k=$ __③__ N/m；该弹簧的劲度系数 k 与其自由长度 l_0（单位为 m）的关系的表达式为 $k=$ __④__ N/m。

3. 2015 年山东理综卷第 21 题

某同学通过下述实验验证力的平行四边形定则。实验步骤：

① 将弹簧秤固定在贴有白纸的竖直木板上，使其轴线沿竖直方向。

② 如图 11－3－1 所示，将环形橡皮筋一端挂在弹簧秤的秤钩上，另一端用圆珠笔尖竖直向下拉，直到弹簧秤示数为某一设定值时，将橡皮筋两端的位置记为 O_1、O_2，记录弹簧秤的示数 F，测量并记录 O_1、O_2 间的距离（即橡皮筋的长度 l）。每次将弹簧秤示数改变 0.50 N，测出所对应的 l，部分数据如下表所示：

F/N	0	0.50	1.00	1.05	2.00	2.50
l/cm	l_0	10.97	12.02	13.00	13.98	15.05

③ 找出②中 $F = 2.50$ N 时橡皮筋两端的位置，重新记为 O、O'，橡皮筋的拉力记为 $F_{OO'}$。

④ 在秤钩上涂抹少许润滑油，将橡皮筋搭在秤钩上，如图 11－3－2 所示。用两圆珠笔尖成适当角度同时拉橡皮筋的两端，使秤钩的下端到达 O 点，将两笔尖的位置标记为 A、B，橡皮筋 OA 段的拉力记为 F_{OA}，OB 段的拉力记为 F_{OB}。

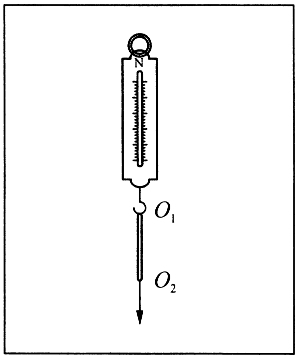


图 11－3－1

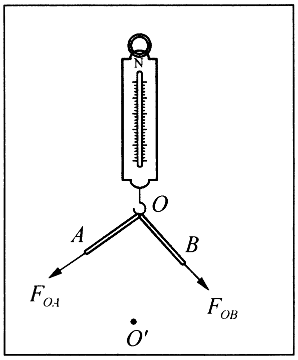


图 11－3－2

完成下列作图和填空：

(1) 利用表中数据在给出的坐标纸上画出 $F-l$ 图线，根据图线求得 $l_0 =$ ________ cm。

(2) 测得 $OA = 6.00$ cm，$OB = 7.60$ cm，则 F_{OA} 的大小为________N。

(3) 根据给出的标度，作出 F_{OA} 和 F_{OB} 的合力 F' 的图示。

(4) 通过比较 F' 与________的大小和方向，即可得出实验结论。

思路点拨

1. 实验中给出了弹簧秤示数 F（即橡皮筋所受拉力）与橡皮筋的长度 l 的对应关系，实质是在研究这根橡皮筋的性质，根据画出的 $F-l$ 图线，可知它的原长 l_0 和劲度系数 k。

2. 如图 11-3-2 所示，将橡皮筋搭在秤钩上时，因为在秤钩上涂抹有润滑油，可认为橡皮筋仍能自由伸缩，此时橡皮筋总长 $l=OA+OB=13.60\ \text{cm}$，伸长量 $\Delta l=l-l_0=3.60\ \text{cm}$，则橡皮筋的弹力 $F=k\Delta l=1.8\ \text{N}$，由平衡条件可知两侧拉力 $F_{OA}=F_{OB}=F=1.8\ \text{N}$。

3. 步骤③中，橡皮筋一端挂在弹簧秤的秤钩上，当橡皮筋的拉力为 $F_{OO'}$ 时，橡皮筋与秤钩相连的位置恰在 O 点；步骤④中，将橡皮筋搭在秤钩上，沿着 OA、OB 两个方向拉橡皮筋，使秤钩的下端仍到达 O 点；由此可知，拉力 $F_{OO'}$ 的作用效果和两个力 F_{OA}、F_{OB} 的作用效果都是让弹簧秤伸长到同一位置，所以力 $F_{OO'}$ 就是两个力 F_{OA}、F_{OB} 的合力。

分析与解答

(1) 作出 $F-l$ 图象如图 11-3-3 所示，求得直线的横截距即为 l_0，可得 $l_0=10.00\ \text{cm}$。

(2) 可计算橡皮筋的劲度系数为 $k=\dfrac{F}{\Delta x}=\dfrac{1}{0.02}\ \text{N/m}=50\ \text{N/m}$；若 $OA=6.00\ \text{cm}$，$OB=7.60\ \text{cm}$，则橡皮筋的弹力 $F=k\Delta l=50\times(6.00+7.60-10.00)\times10^{-2}\ \text{N}=1.8\ \text{N}$；则此时 $F_{OA}=F_{OB}=F=1.8\ \text{N}$。

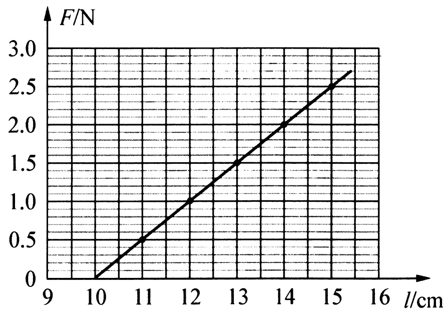


图 11-3-3

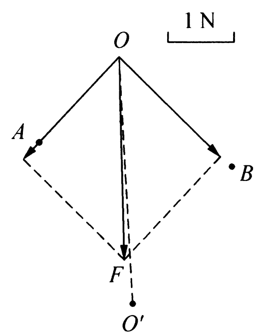


图 11-3-4

(3) 如图 11-3-4 所示。

(4) 通过比较 F' 和 $F_{OO'}$ 的大小和方向，可得出实验结论。

答案：(1) 10.00(9.8、9.9、10.1 均正确)　(2) 1.80(1.70—1.90 均正确)　(3) 如图 11-3-4 所示　(4) $F_{OO'}$

考点伸展

3. (2018 年全国理综Ⅱ卷)某同学用图 11-3-5 所示的装置测量木块与木板之间的摩擦因数。跨过光滑定滑轮的细线两端分别与木块和弹簧秤相连，滑轮和木块之间的细线保持水平，在木块上放置砝码。缓慢向左拉动水平放置的木板，当木块和砝码相对桌面静止且木板仍在继续滑动时，弹簧秤的示数即为木块受到的滑动摩擦力的大小。某次实验所得数据在下表中给出，其中 f_4 的值从图 11-3-6 中弹簧秤的示数读出。

砝码的质量 m/kg	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
滑动摩擦力 f/N	2.15	2.36	2.55	f_4	2.93

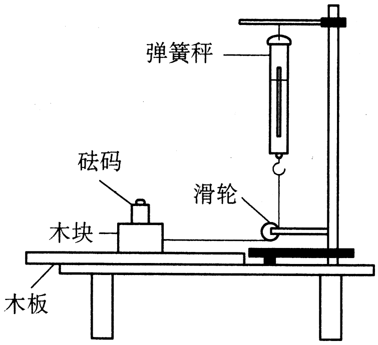


图 11-3-5

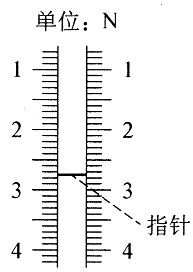


图 11-3-6

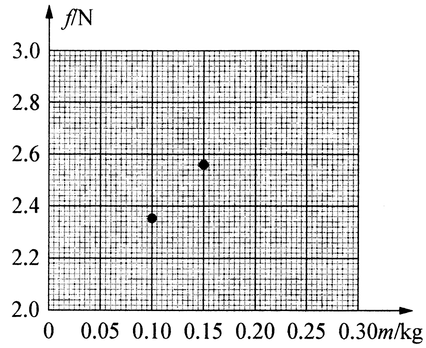


图 11-3-7

回答下列问题

(1) $f_4 =$ ________N；

(2) 在图 11-3-7 的坐标纸上补齐未画出的数据点，并绘出 $f-m$ 图线；

(3) f 与 m、木块质量 M、木板和木块之间的滑动摩擦因数 μ 及重力加速度大小 g 之间的关系式 $f =$ ________，$f-m$ 图线(直线) 的斜率的表达式 $k =$ ________；

(4) 取 $g = 9.80\ \text{m/s}^2$，由绘出的 $f-m$ 图线求得 $\mu =$ ________。(保留 2 位有效数字)

4. 2016 年全国理综Ⅲ卷第 23 题

某物理课外小组利用图 11-4-1 中的装置探究物体加速度与其所受合外力之间的关系。图中，置于试验台上的长木板水平放置，其右端固定一轻滑轮：轻绳跨过滑轮，一端与放在木板上的小滑车相连，另一端可悬挂钩码。本实验中可用的钩码共有 $N=5$ 个，每个质量均为0.010 kg。实验步骤如下：

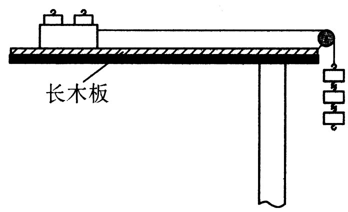


图 11-4-1

(1) 将 5 个钩码全部放入小车中，在长木板左下方垫上适当厚度的小物块，使小车(和钩码)可以在木板上匀速下滑。

(2) 将 n(依次取 $n=1,2,3,4,5$)个钩码挂在轻绳右端，其余 $N-n$ 个钩码仍留在小车内；用手按住小车并使轻绳与木板平行。释放小车，同时用传感器记录小车在时刻 t 相对于其起始位置的位移 s，绘制 $s-t$ 图象，经数据处理后可得到相应的加速度 a。

(3) 对应于不同的 n 的 a 值见下表。$n=2$ 时 $s-t$ 图象如图 11-4-2 所示：由图 11-4-2 求出此时小车的加速度(保留 2 位有效数字)，将结果填入下表。

n	1	2	3	4	5
$a/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	0.20		0.58	0.78	1.00

(4) 利用表中的数据在图 11-4-3 中补齐数据点，并作出 $a-n$ 图象。从图象可以看出：当物体质量一定时，物体的加速度与其所受的合外力成正比。

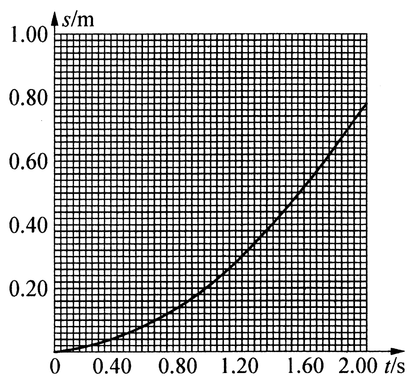


图 11-4-2

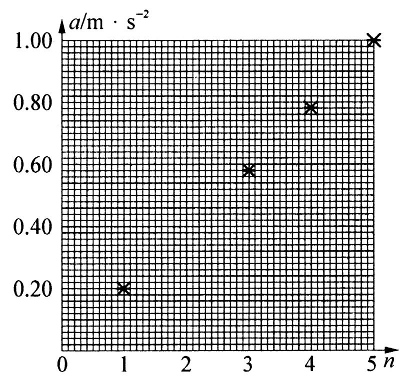


图 11-4-3

(5) 利用 $a-n$ 图象求得小车(空载)的质量为________kg(保留 2 位有效数字，重力加速度取 $g=9.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)。

(6) 若以“保持木板水平”来代替步骤(1)，下列说法中正确的是________(填入正确选项前的标号)。

A. $a-n$ 图线不再是直线　　B. $a-n$ 图线仍是直线，但该直线不过原点

C. $a-n$ 图线仍是直线，但该直线的斜率变大

思路点拨

1. 明确实验装置。

2. 分析实验步骤：步骤(1)平衡小车(和钩码)所受的摩擦力；步骤(2)将小车中的钩码取出挂在轻绳右端，保持总的钩码数不变，说明实验中应以小车和钩码的整体作为研究对象。

3. 明确实验原理：以小车和 5 个钩码的整体为研究对象，挂在轻绳右端的钩码所受的重力为系统所受合外力，通过改变挂在绳端的钩码个数即可改变合外力大小，从而探究系统加速度与其所受合外力之间的关系。

4. 数据处理的方法：系统的加速度是利用传感器记录的小车在时刻 t 相对于其起始位置的位移 s，通过公式 $s=\frac{1}{2}at^2$ 计算得出；系统的加速度 a 与其所受合外力的关系是通过做出 $a-n$ 图象分析得出的。设小车质量为 M，钩码质量为 m，根据实验原理，加速度 a 与合外力满足 $nmg=(5m+M)a$，若 $a-n$ 图象为过原点的倾斜直线，说明在物体质量一定时，物体的加速度与其所受的合外力成正比。

5. 误差分析：若实验过程中保持木板水平，则小车运动时还会受到摩擦力，此时系统所受的合外力为绳端钩码的重力与小车(包括钩码)所受摩擦力的合力。

分析与解答

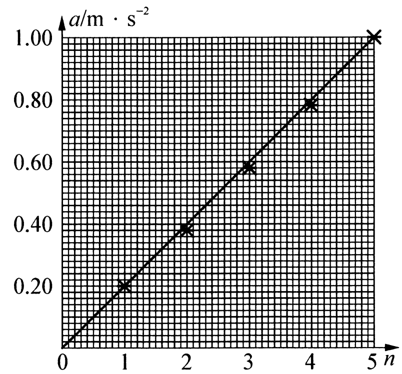


图 11-4-4

① 当 $n=2$ 时，由 $s-t$ 图象可知，小车运动 2 s，相对于其起始位置的位移 $s=0.78\,\text{m}$，通过公式 $s=\frac{1}{2}at^2$，计算得出 $a=0.39\,\text{m/s}^2$。

② 描点、连线，得出 $a-n$ 图象如图 11-4-4 所示。

③ 根据实验原理，系统加速度 a 与合外力满足 $nmg=(5m+M)a$，即 $a=\frac{mg}{(5m+M)}n$，因此 $a-n$ 图象的斜率 $k=\frac{mg}{(5m+M)}$，利用图象可求得小车质量 $M\approx 0.45\,\text{kg}$(在 0.43 ~ 0.47 范围内都给分)。

④ 若实验过程中保持木板水平，则小车运动时还会受到摩擦力，此时系统所受的合外力为右侧绳端钩码的重力与小车(包括钩码)所受摩擦力的合力。设小车与长木板间的动摩擦因数为 μ，则满足 $nmg-\mu[(5-n)m+M]g=(5m+M)a$，由此可知 a 与 n 成一次函数关系，斜率 $k'=\frac{(\mu+1)mg}{(5m+M)}>k$，斜率变大。因此正确答案为 BC。

答案：(3) 0.39　(4) $a-n$ 图线如图 11-4-4 所示　(5) 0.45　(6) BC

考点伸展

4. (2014 年全国理综 Ⅰ 卷第 22 题)某同学利用图 11-4-5 所示实验装置及数字化信息系统获得了小车加速度 a 与钩码的质量 m 的对应关系图，如图 11-4-6 所示。实验中小车(含发射器)的质量为 200 g，实验时选择了不可伸长的轻质细绳和轻定滑轮，小车的加速度由位移传感器及与之相连的计算机得到，回答下列问题：

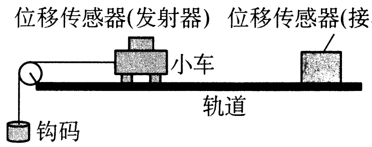


图 11－4－5

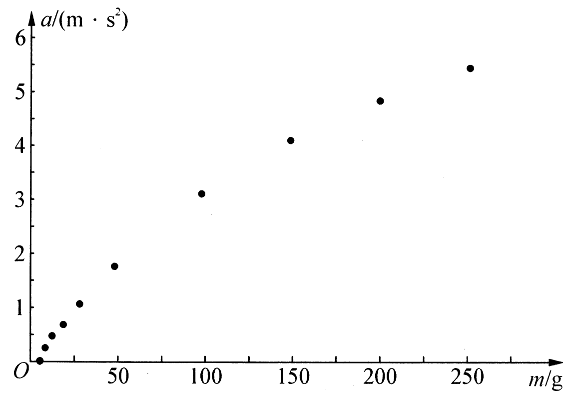


图 11－4－6

（1）根据该同学的结果，小车的加速度与钩码的质量成________（选填“线性”或“非线性”）关系。

（2）由图 11－4－6 可知，$a-m$ 图线不经过原点，可能的原因是________。

（3）若利用本实验装置来验证“在小车质量不变的情况下，小车的加速度与作用力成正比”的结论，并直接以钩码所受重力 mg 作为小车受到的合外力，则实验中应采取的改进措施是________，钩码的质量应满足的条件是________。

5. 2017 年江苏物理卷第 10 题

利用如图 11－5－1 所示的实验装置探究恒力做功与物体动能变化的关系。小车的质量为 $M=200.0\text{ g}$，钩码的质量为 $m=10.0\text{ g}$，打点计时器的电源为 50 Hz 的交流电。

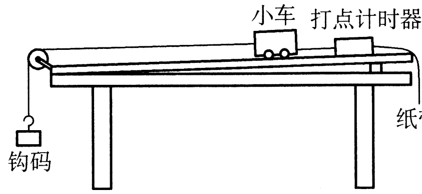


图 11－5－1

(1) 挂钩码前，为了消除摩擦力的影响，应调节木板右侧的高度，直至向左轻推小车观察到____________。

(2) 挂上钩码，按实验要求打出的一条纸带如图 11－5－2 所示。选择某一点为 O，依次每隔 4 个计时点取一个计数点。用刻度尺量出相邻计数点间的距离 Δx，记录在纸带上。计算打出各计数点时小车的速度 v，其中打出计数点“1”时小车的速度 $v_1=$________m/s。

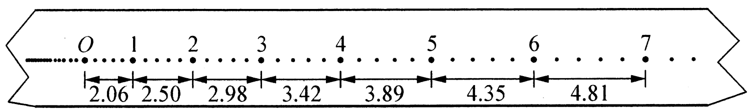


图 11－5－2

(3) 将钩码的重力视为小车受到的拉力，取 $g=9.80\text{ m/s}^2$，利用 $W=mg\Delta x$ 算出拉力对小车做的功 W。利用 $E_k=\frac{1}{2}Mv^2$ 算出小车动能，并求出动能的变化量 ΔE_k。计算结果见下表。

$W/\times10^{-3}$ J	2.45	2.92	3.35	3.81	4.26
$\Delta E_k/\times10^{-3}$ J	2.31	2.73	3.12	3.61	4.00

请根据表中的数据，在图 11－5－3 的方格纸上作出 ΔE_k-W 图象。

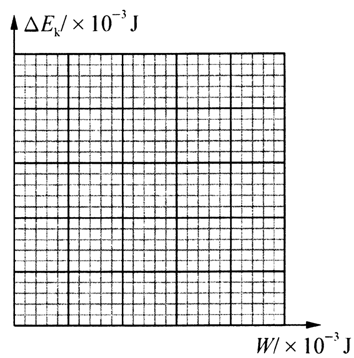


图 11－5－3

(4) 实验结果表明，ΔE_k 总是略小于 W。某同学猜想是由于小车所受拉力小于钩码重力造成的。用题中小车和钩码质量的数据可算出小车受到的实际拉力 $F=$________N。

思路点拨

1. 明确实验目的：定量探究绳拉力做功与小车动能变化的关系。

2. 明确实验原理：①细绳的拉力对小车做功应是合外力做功，因此实验中应平衡摩擦，并且通过调节木板上定滑轮的高度，使细绳与木板平行，保证细绳拉力等于小车所受的合力。②本实验中，细绳对小车的拉力无法定量测出，因而将钩码的重力近似当作细绳拉力，把钩码重力做的功近似当作细绳拉力做的功；只有在钩码做匀速运动时细线的拉力才与重力相等，事实上钩码在向下加速，处于失重状态，绳线的拉力小于重力，根据牛顿第二定律可以计算绳的拉力与钩码重力的大小关系。

3. 实验数据的处理：测出钩码的质量 m 与小车的质量 M，在纸带上从原点开始选取一段距离 x，而速度 v 用平均速度替代，寻找细绳拉力做功 mgx 与小车动能变化 $\frac{1}{2}Mv^2$ 的关系。

4. 误差分析：实验中将钩码重力做的功当作细绳拉力做的功存在系统误差，由于钩码随着小车一起做匀加速运动，钩码处于失重状态，细绳拉力小于重力，即钩码重力做的功大于细绳拉力做的功。为了尽可能减小实验误差，应使钩码的质量远小于小车质量。

分析与解答

(1) 挂钩码前，为了消除摩擦力的影响，应调节木板右侧的高度，直至向左轻推小车观察到小车做匀速运动，使摩擦力得到平衡。

(2) 计数点 1 是计数点 0 和 2 的时间中点，则其瞬时速度 $v_1 = \frac{x_0^2}{2T} = \frac{(2.06+2.50)\times10^{-2}}{0.2}$ m/s $=$ 0.228 m/s。

(3) 根据表格中的数据作出 $\Delta E_k - W$ 图象如图 11－5－4 所示。

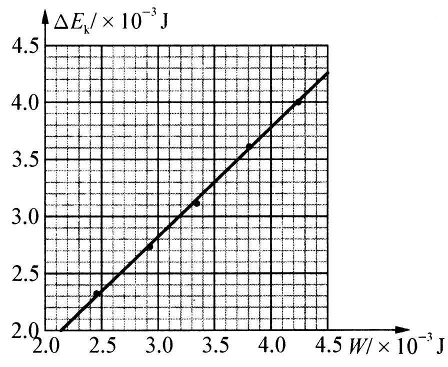


图 11－5－4

(4) 对整体分析，根据牛顿第二定律得，$a = \frac{mg}{M+m}$，则小车受到的实际拉力 $F = Ma = \frac{Mmg}{M+m} = \frac{0.2\times0.01\times9.8}{0.2+0.01}$ N $=$ 0.093 N。

答案：(1) 小车做匀速运动

(2) 0.228

(3) 如图 11－5－4 所示

(4) 0.093

考点伸展

5. (2019 年江苏物理卷第 10 题)某兴趣小组用如图 11－5－5 所示的装置验证动能定理。

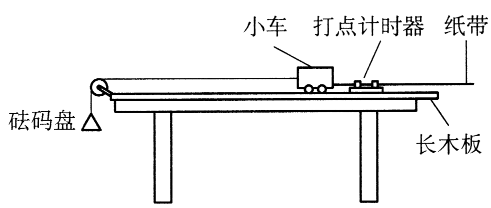


图 11－5－5

(1) 有两种工作频率均为 50 Hz 的打点计时器供实验选用：

A. 电磁打点计时器

B. 电火花打点计时器

为使纸带在运动时受到的阻力较小，应选择________(选填“A”或“B”)；

(2) 保持长木板水平，将纸带固定在小车后端，纸带穿过打点计时器的限位孔。实验中，为消除摩擦力的影响，在砝码盘中慢慢加入沙子，直到小车开始运动。同学甲认为此时摩擦力的影响已得到消除。同学乙认为还应从盘中取出适量沙子，直至轻推小车观察到小车做匀速运动。看法正确的同学是________（选填“甲”或“乙”）；

(3) 消除摩擦力的影响后，在砝码盘中加入砝码。接通打点计时器电源，松开小车，小车运动；纸带被打出一系列点，其中的一段如图 11-5-6 所示。图中纸带按实际尺寸画出，纸带上 A 点的速度 $v_A=$ ________ m/s；

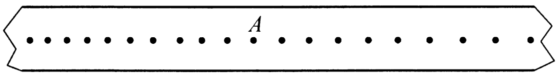


图 11-5-6

(4) 测出小车的质量为 M，再测出纸带上起点到 A 点的距离为 L。小车动能的变化量可用 $\Delta E_k=\frac{1}{2}Mv_A^2$ 算出。砝码盘中砝码的质量为 m，重力加速度为 g；实验中，小车的质量应________（选填“远大于”“远小于”或“接近”）砝码、砝码盘和沙子的总质量，小车所受合力做的功可用 $W=mgL$ 算出，多次测量，若 W 与 ΔE_k 均基本相等则验证了动能定理。

6. 2016 年江苏物理卷第 11 题

某同学用如图 11－6－1 所示的装置验证机械能守恒定律。一根细线系住钢球，悬挂在铁架台上，钢球静止于 A 点，光电门固定在 A 的正下方。在钢球底部竖直地粘住一片宽带为 d 的遮光条。将钢球拉至不同位置由静止释放，遮光条经过光电门的挡光时间 t 由计时器测出，取 $v=\frac{d}{t}$ 作为钢球经过 A 点时的速度。记录钢球每次下落的高度 h 和计时器示数 t，计算并比较钢球在释放点和 A 点之间的势能变化大小 ΔE_p 与动能变化大小 ΔE_k，就能验证机械能是否守恒。

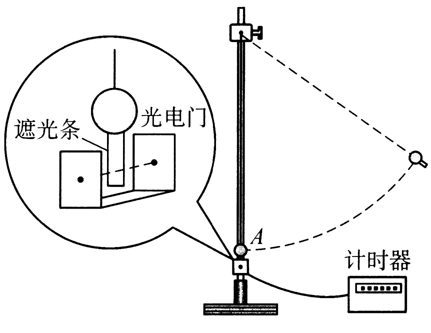


图 11－6－1

（1）用公式 $\Delta E_p=mgh$ 计算钢球重力势能变化的大小，式中钢球下落高度 h 应测量释放时的钢球球心到________之间的竖直距离。

A．钢球在 A 点时的顶端

B．钢球在 A 点时的球心

C．钢球在 A 点时的底端

（2）用 $\Delta E_k=\frac{1}{2}mv^2$ 计算钢球动能变化的大小，用刻度尺测量遮光条宽度，示数如图 11－6－2 所示，其读数为________cm。某次测量中，计时器的示数为 0.010 0 s，则钢球的速度为 $v=$________m/s。

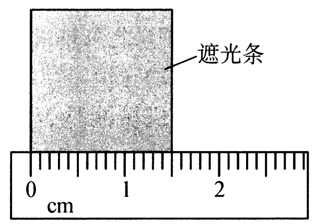


图 11－6－2

（3）下表为该同学的实验结果：

$\Delta E_p/\times10^{-2}$ J	4.892	9.786	14.69	19.59	29.38
$\Delta E_k/\times10^{-2}$ J	5.04	10.1	15.1	20.0	29.8

他发现表中的 ΔE_p 与 ΔE_k 之间存在差异，认为这是由于空气阻力造成的。你是否同意他的观点？请说明理由。

（4）请你提出一条减小上述差异的改进建议。

思路点拨

1. 通过阅读题目明确实验原理：比较钢球在释放点和 A 点之间的势能变化大小 ΔE_p 与动能变化大小 ΔE_k，验证机械能是否守恒。

2. 明确实验数据的测量方法：①钢球下落的高度 h，由于钢球有一定的体积，应取其重心下落的竖直距离；②钢球经过 A 点时的速度 v 应是球心的线速度，题中取遮光条经光电门时的瞬时速度来代替。

3. 分析误差的主要来源：测量钢球经过 A 点时的速度存在系统误差，使得速度的测量值总

是偏大，造成 ΔE_p 与 ΔE_k 之间存在差异。

分析与解答

(1) 钢球下落高度 h 应测量释放时的钢球球心到钢球在 A 点时的球心之间的竖直距离，选项 B 正确。

(2) 毫米刻度尺的读数要注意估读到毫米的下一位，应读 1.50 cm。钢球的速度 $v=\frac{d}{t}=$ 1.50 m/s。

(3) 从表中可以发现，测量所得结果势能变化大小 ΔE_p 与动能变化大小 ΔE_k 之间存在差异，且 ΔE_k 大于 ΔE_p，若是由于空气阻力的原因会使得 ΔE_k 小于 ΔE_p，所以应是速度的测量值偏大造成的系统误差。这位同学的观点不正确。

(4) 要减小实验的上述差异，应设法使得小球达到 A 点时速度的测量值更精确，可以分别测出光电门和球心到悬点的长度为 L 和 l，计算 ΔE_k 时，将 v 折算成钢球的速度 $v'=\frac{l}{L}v$。

答案：(1) B　(2) 1.50(1.49～1.51 都算对)　1.50(1.49～1.51 都算对)

(3) 不同意，因为空气阻力会造成 ΔE_k 小于 ΔE_p，但表中 ΔE_k 大于 ΔE_p

考点伸展

6. (1)(2016 北京理综卷第 21 题)利用如图 11－6－3 所示装置做“验证机械能守恒定律”实验。

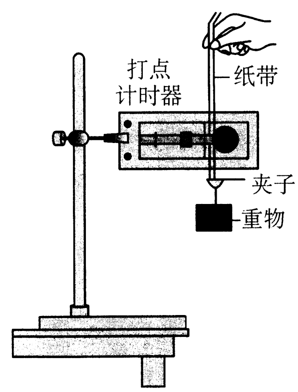


图 11－6－3

① 为验证机械能是否守恒，需要比较重物下落过程中任意两点间的________。

A．动能变化量与势能变化量

B．速度变化量和势能变化量

C．速度变化量和高度变化量

② 除带夹子的重物、纸带、铁架台(含铁夹)、电磁打点计时器、导线及开关外，在下列器材中，还必须使用的两种器材是________。

A．交流电源　　B．刻度尺　　C．天平(含砝码)

③ 实验中，先接通电源，再释放重物，得到如图 11－6－4 所示的一条纸带。在纸带上选取三个连续打出的点 A、B、C，测得它们到起始点 O 的距离分别为 h_A、h_B、h_C。已知当地重力加速度为 g，打点计时器打点的周期为 T。设重物的质量为 m。从打 O 点到打 B 点的过程中，重物的重力势能变化量 $\Delta E_p=$________，动能变化量 $\Delta E_k=$________。

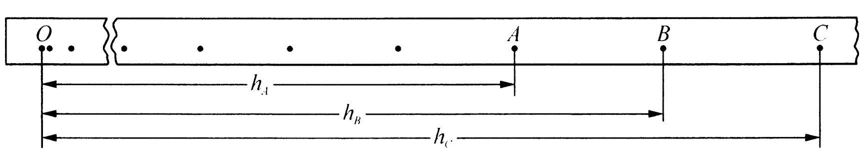


图 11－6－4

④ 大多数学生的实验结果显示，重力势能的减少量大于动能的增加量，原因是____________。

A．利用公式 $v = gt$ 计算重物速度

B．利用公式 $v = \sqrt{2gh}$ 计算重物速度

C．存在空气阻力和摩擦力阻力的影响

D．没有采用多次实验求平均值的方法

⑤ 某同学想用下述方法研究机械能是否守恒：在纸带上选取多个计数点，测量它们到起始点 O 的距离 h，计算对应计数点的重物速度 v，描绘 $v^2 - h$ 图象，并做如下判断：若图象是一条过原点的直线，则重物下落过程中机械能守恒。请你分析讨论该同学的判断依据是否正确。

(2)（2017 年天津理综卷第 9 题）如图 11－6－5 所示，打点计时器固定在铁架台上，使重物带动纸带从静止开始自由下落，利用此装置验证机械能守恒定律。

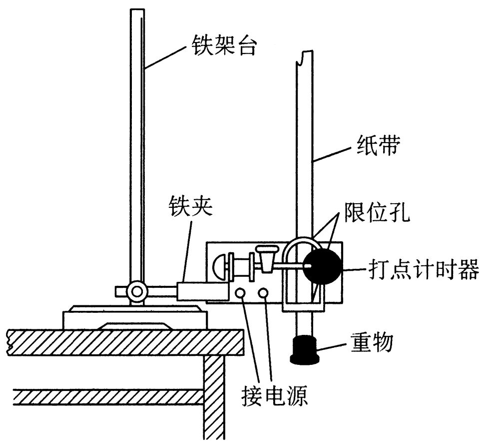


图 11－6－5

① 对于该实验，下列操作中对减小实验误差有利的是________。

A．重物选用质量和密度较大的金属锤

B．两限位孔在同一竖直面内上下对正

C．精确测量出重物的质量

D．用手托稳重物，接通电源后，撒手释放重物

② 某实验小组利用上述装置将打点计时器接到 50 Hz 的交流电源上，按正确操作得到了一条完整的纸带，由于纸带较长，图中有部分未画出，如图 11－6－6 所示。纸带上各点是打点计时器打出的计时点，其中 O 点为纸带上打出的第一个点。重物下落高度应从纸带上计时点间的距离直接测出，利用下列测量值能完成验证机械能守恒定律的选项有________。

A．OA、AD 和 EG 的长度　　B．OC、BC 和 CD 的长度

C．BD、CF 和 EG 的长度　　D．AC、BD 和 EG 的长度

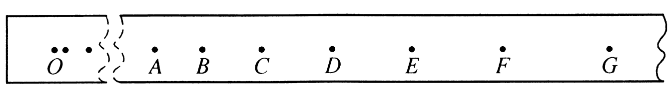


图 11－6－6

7. 2019 年北京理综卷第 21 题

用如图 11－7－1 所示装置研究平抛运动。将白纸和复写纸对齐重叠并固定在竖直的硬板上。钢球沿斜槽轨道 PQ 滑下后从 Q 点飞出，落在水平挡板 MN 上。由于挡板靠近硬板一侧较低，钢球落在挡板上时，钢球侧面会在白纸上挤压出一个痕迹点。移动挡板，重新释放钢球，如此重复，白纸上将留下一系列痕迹点。

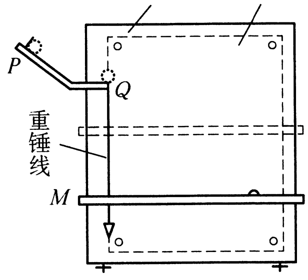


图 11－7－1

(1) 下列实验条件中必须满足的有________。

A．斜槽轨道光滑

B．斜槽轨道末段水平

C．挡板高度等间距变化

D．每次从斜槽上相同的位置无初速度释放钢球

(2) 为定量研究，建立以水平方向为 x 轴、竖直方向为 y 轴的坐标系。

a. 取平抛运动的起始点为坐标原点，将钢球静置于 Q 点，钢球的________(选填“最上端”、“最下端”或者“球心”)对应白纸上的位置即为原点；在确定 y 轴时________(选填“需要”或者“不需要”) y 轴与重锤线平行。

b. 若遗漏记录平抛轨迹的起始点，也可按下述方法处理数据：如图 11－7－2 所示，在轨迹上取 A、B、C 三点，AB 和 BC 的水平间距相等且均为 x，测得 A、B 和 B、C 的竖直间距分别是 y_1 和 y_2，则 $\frac{y_1}{y_2}$________$\frac{1}{3}$(选填“大于”、“等于”或者“小于”)。可求得钢球平抛的初速度大小为________(已知当地重力加速度为 g，结果用上述字母表示)。

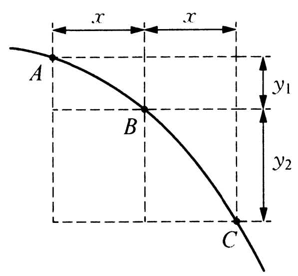


图 11－7－2

(3) 为了得到平抛物体的运动轨迹，同学们还提出了以下三种方案，其中可行的是________。

A．从细管水平喷出稳定的细水柱，拍摄照片，即可得到平抛运动轨迹

B．用频闪照相在同一底片上记录平抛小球在不同时刻的位置，平滑连接各位置，即可得到平抛运动轨迹

C．将铅笔垂直于竖直的白纸板放置，笔尖紧靠白纸板，铅笔以一定初速度水平抛出，将会在白纸上留下笔尖的平抛运动轨迹

(4) 伽利略曾研究过平抛运动，他推断：从同一炮台水平发射的炮弹，如果不受空气阻力，不论它们能射多远，在空中飞行的时间都一样。这实际上揭示了平抛物体________。

A．在水平方向上做匀速直线运动

B．在竖直方向上做自由落体运动

C．在下落过程中机械能守恒

(5) 牛顿设想，把物体从高山上水平抛出，速度一次比一次大，落地点就一次比一次远，如果速度足够大，物体就不再落回地面，它将绕地球运动，成为人造地球卫星。

同样是受地球引力，随着抛出速度增大，物体会从做平抛运动逐渐变为做圆周运动，请分析原因。

思路点拨

1. 平抛运动的研究是通过记录下做平抛运动物体的轨迹进行研究的。因此本实验的设计是通过不同的方式得到平抛运动的轨迹，除了频闪照片，一般情况下，一次运动只能记录一个位置，因此在本实验中需要做多次完全相同的平抛运动。在同一重力场中，只要平抛的初速度相同即可。

2. 平抛运动可分解为竖直方向的自由落体运动和水平方向的匀速直线运动。

分析与解答

(1) 本实验中要保证小球每次飞出斜槽末端时的速度为水平，即小球做平抛运动，且每次飞出时的速度应相同，所以只要每次将小球从斜槽上同一位置由静止释放即可，与轨道是否光滑无关，故选项 BD 正确。

(2) a. 平抛运动的起始点应为钢球静置于 Q 点时，钢球的球心对应纸上的位置，由于平抛运动在竖直方向做自由落体运动，所以在确定 y 轴时需要 y 轴与重锤线平行。

b. 由初速度为零的匀加速直线运动规律即在相等时间间隔内所通过的位移之比为 1∶3∶5∶7∶…，由于 A 点不是抛出点，不妨设 A 点竖直方向的分速度为 v_{Ay}，设 A、B，B、C 间所用的时间为 T，则 $y_1 = v_{Ay}T + \frac{1}{2}gT^2$、$y_2 = (v_{Ay} + gT)\cdot T + \frac{1}{2}gT^2 = v_{Ay}T + \frac{3}{2}gT^2$ 所以 $\frac{y_1}{y_2} = \frac{v_{Ay}T + \frac{1}{2}gT^2}{v_{Ay}T + \frac{3}{2}gT^2} > \frac{\frac{1}{2}gT^2}{\frac{3}{2}gT^2} = \frac{1}{3}$。根据匀变速运动规律可知：$y_2 - y_1 = gT^2$，水平方向有：$x = v_0 T$，联立解得：$v_0 = x\sqrt{\frac{g}{y_2 - y_1}}$。

(3) A 项：从细管水平喷出稳定的细水柱，由于细水柱射出后受到空气阻力的影响较大，故不可行；B 项：用频闪照相在同一底片上记录小球不同时刻的位置即平抛运动的轨迹上的点，平滑连接在一起即为平抛运动轨迹，所以此方案可行；C 项：将铅笔垂直于竖直的白板放置，以一定初速度水平抛出，笔尖与白纸间有摩擦阻力的作用，所以铅笔做的不是平抛运动，故此方案不可行。

(4) 由平抛运动竖直方向运动可知，$h = \frac{1}{2}gt^2$，时间 $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$，所以只要高度相同，时间相同，故 B 正确。

(5) 物体初速度较小时，运动范围很小，引力可以看作恒力——重力，做平抛运动；随着物体初速度增大，物体运动范围变大，引力不能再看作恒力；当物体初速度达到第一宇宙速度时，做圆周运动而成为地球卫星。

答案：(1) BD

(2) a. 球心　需要

b. 大于　$x\sqrt{\frac{g}{y_2 - y_1}}$

(3) B

(4) B

(5) 物体初速度较小时，运动范围很小，引力可以看作恒力——重力，做平抛运动；随着物体

初速度增大，运动范围变大，引力不能再看作恒力；当物体初速度达到第一宇宙速度时，做圆周运动而成为地球卫星。

考点伸展

7.（浙江 2019 年 4 月选考第 17 题）采用如图 11－7－3 所示的实验装置做“研究平抛运动”的实验。

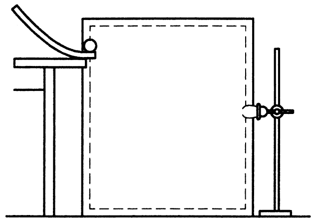


图 11－7－3

（1）实验时需要下列哪个器材________。

A．弹簧秤　　B．重锤线　　C．打点计时器

（2）做实验时，让小球多次沿同一轨道运动，通过描点法画出小球平抛运动的轨迹。下列的一些操作要求中，正确的是________。（多选）

A．每次必须由同一位置静止释放小球

B．每次必须严格地等距离下降记录小球位置

C．小球运动时不应与木板上的白纸相接触

D．记录的点应适当多一些

（3）若用频闪摄影方法来验证小球在平抛过程中水平方向是匀速运动，记录下如图 11－7－4 所示的频闪照片。

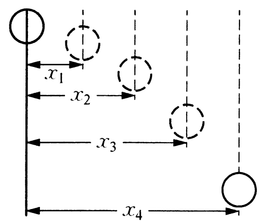


图 11－7－4

在测得 x_1，x_2，x_3，x_4 后，需要验证的关系是________。已知频闪周期为 T，用下列计算式求得的水平速度，误差较小的是________

A．$\frac{x_1}{T}$　　B．$\frac{x_2}{2T}$

C．$\frac{x_3}{3T}$　　D．$\frac{x_4}{4T}$

专题十二　电学实验

1. 2019 年江苏物理卷第 11 题

某同学测量一段长度已知的电阻丝的电阻率。实验操作如下：

(1) 螺旋测微器如图 12－1－1 所示。在测量电阻丝直径时，先将电阻丝轻轻地夹在测砧与测微螺杆之间，再旋动________(选填“A”“B”或“C”)，直到听见“喀喀”的声音，以保证压力适当，同时防止螺旋测微器的损坏。

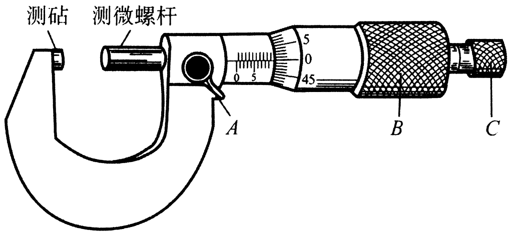


图 12－1－1

(2) 选择电阻丝的________(选填“同一”或“不同”)位置进行多次测量，取其平均值作为电阻丝的直径。

(3) 图 12－1－2 中 R_x，为待测电阻丝。请用笔画线代替导线，将滑动变阻器接入图 12－1－3实物电路中的正确位置。

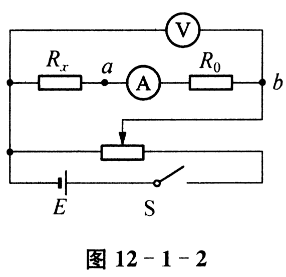


图 12－1－2

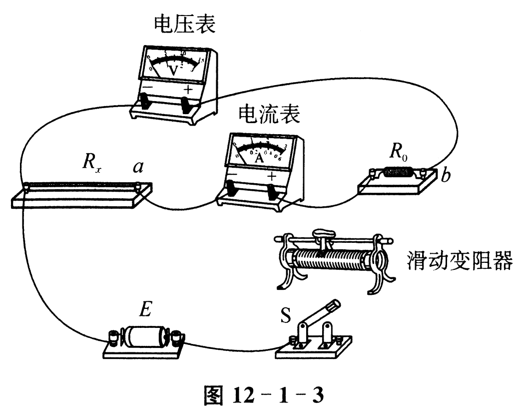


图 12－1－3

(4) 为测量 R，利用图 12－1－2 所示的电路，调节滑动变阻器测得 5 组电压 U_1 和电流 I_1 的值，作出的 U_1-I_1 关系图象如图 12－1－4 所示。接着，将电压表改接在 a、b 两端，测得 5 组电压 U_2 和电流 I_2 的值，数据见下表：

U_2/V	0.50	1.02	1.54	2.05	2.55
I_2/mA	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0

请根据表中的数据，在方格纸上作出 U_2-I_2 图象。

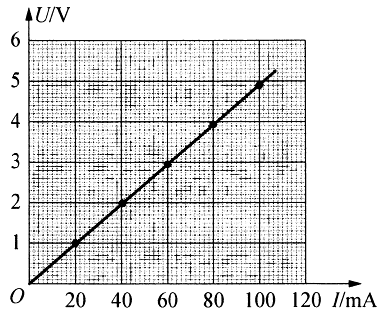


图 12-1-4

(5) 由此，可求得电阻丝的 $R_x=$ ________ Ω。根据电阻定律可得到电阻丝的电阻率。

思路点拨

1. 螺旋测微器的基本使用法：左手持尺架，右手转动粗调旋钮 B 使测微螺杆与测砧间距稍大于被测物，放入被测物，转动微调旋钮到夹住被测物，直到棘轮发出声音为止，拨动固定旋钮 A 使测杆固定后进行读数。

2. 根据电路图接实物图，先要认清楚电路的结构。对于伏安法测电阻而言，电路的结构主要考虑滑动变阻器是分压还是限流、电流表是外接还是内接，按测量电路和控制电路分别进行连接。

3. 为了减少伏安法测电阻的系统误差，需要利用测到的数据，根据题给的电压表与电流表的内阻大小，判断 R_x 和 $\sqrt{R_V R_A}$ 的大小，当 $R_x>\sqrt{R_V R_A}$ 时，采用电流表内接法，电流表内接时，实际测得的电阻是待测电阻和电流表的内阻之和；当 $R_x<\sqrt{R_V R_A}$ 时，采用电流表外接法。

分析与解答

(1) 在测量时，为了不损坏被测物体，最后也改用微调旋钮即 C，直到听见"喀喀"的响声。

(2) 为了减小测量误差，应选用电阻丝不同位置进行多次测量。

(3) 按照原理图，将实物图连线如图 12-1-5。

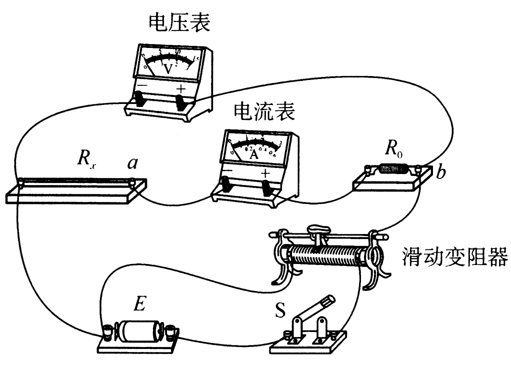


图 12-1-5

(4) 将表格中各组数据在坐标纸上描出，再连成一条直线，如图 12 - 1 - 6：

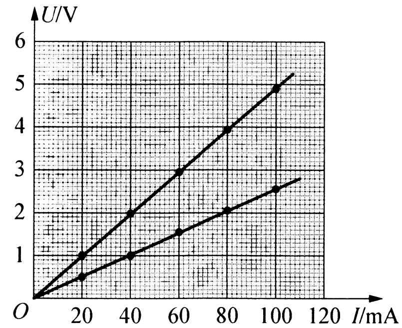


图 12 - 1 - 6

当电压表按图 12 - 1 - 5 连接时，电压表测的电压为 R_x，R_0 和电流表内阻上的电压之和，当电压表接在 a、b 间时，电压表测的电压为 R_0 和电流表内阻上的电压，由图可得：$R_x+R_0+R_A=\frac{1.96}{0.04}\ \Omega=49\ \Omega$，$R_0+R_A=\frac{2.04}{0.08}\ \Omega=25.5\ \Omega$，所以 $R_x=23.5\ \Omega$。

考点伸展

1. (2018 年全国理综Ⅲ卷)一课外实验小组用如图所示的电路测量某待测电阻 R_x 的阻值，图中 R_0 为标准定值电阻($R_0=20.0\ \Omega$)；Ⓥ 可视为理想电压表。S_1 为单刀开关，S_2 位单刀双掷开关，E 为电源，R 为滑动变阻器。采用如下步骤完成实验：

(1) 按照实验原理线路图 12 - 1 - 7，将图 12 - 1 - 8 中实物连线；

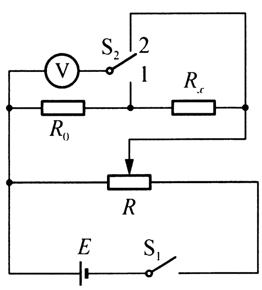


图 12 - 1 - 7

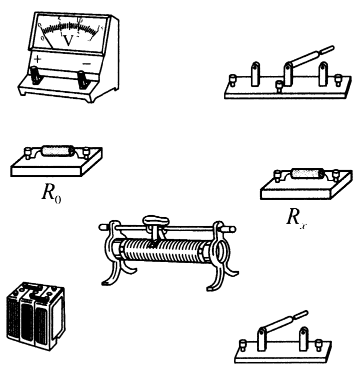


图 12 - 1 - 8

(2) 将滑动变阻器滑动端置于适当位置，闭合 S_1；

(3) 将开关 S_2 掷于 1 端，改变滑动变阻器滑片的位置，记下此时电压表Ⓥ的示数 U_1；然后将 S_2 掷于 2 端，记下此时电压表Ⓥ的示数 U_2；

(4) 待测电阻阻值的表达式 $R_x=$________(用 R_0、U_1、U_2 表示)；

(5) 重复步骤(3)，得到如下数据：

	1	2	3	4	5
U_1/V	0.25	0.30	0.36	0.40	0.44
U_2/V	0.86	1.03	1.22	1.36	1.49
$\frac{U_2}{U_1}$	3.44	3.43	3.39	3.40	3.39

(6) 利用上述 5 次测量所得$\frac{U_2}{U_1}$的平均值，求得 R_x＝________Ω。(保留 1 位小数)

2. 2015 年浙江理综卷第 22 题

图 12－2－1 所示是小红同学在做“描绘小灯泡的伏安特性曲线”实验时的实物连接图。

(1) 根据图 12－2－1 画出实验电路图

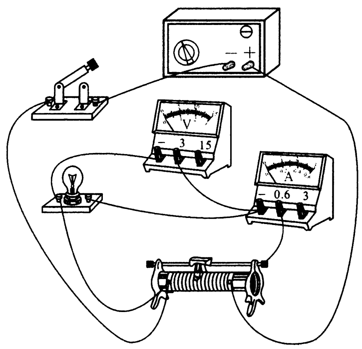


图 12－2－1

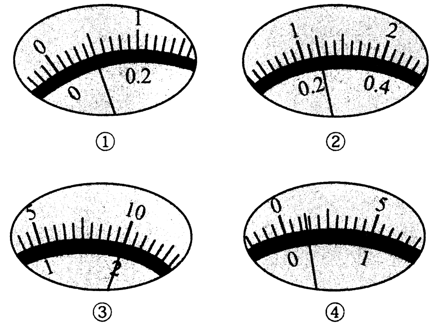


图 12－2－2

(2) 调节滑动变阻器得到了两组电流表与电压表的示数如图 12－2－2 中的①②③④所示，电流表量程为 0.6 A，电压表量程为 3 V。所示读数为：①________ ②________ ③________ ④________。两组数据得到的电阻分别为________和________。

思路点拨

1. 根据实物图画实验电路图时，可以先根据实物图中的所有仪器画出对应的仪器符号，再连接电路，整理后得到电路图。

2. 根据电表的读数规则：量程为 0.6 A 的电流表，每格 0.02 A，在百分位半格估读，读到百分位；量程为 3 V 的电压表，每格 0.1 V，向后估读一位，1/10 估读，读到百分位。

3. 根据测量的数据，利用欧姆定律计算小灯泡的电阻

分析与解答

(1) 从实物图中可知电压表测量灯泡两端电压，电流表采用外接法，滑动变阻器采用分压接法，故电路图如图 12－2－3 所示。

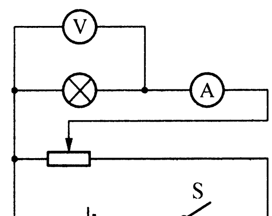


图 12－2－3

(2) 电流表的量程为 0.6 A，所以每小格表示的分度值为 0.02 A，故①的读数为 0.10 A，②的读数为 0.24 A。电压表的量程为 3 V，则每小格表示的分度值为 0.1 V，所以③的读数为 2.00 V，④的读数为 0.27 V。电压小，灯泡的电流小，故①④为同一组数据，故得到的电阻为 $R=\frac{0.27}{0.1}=2.7\,\Omega$，②③为另外一组数据，故得到的电阻为 $R=\frac{2.00}{0.24}=8.3\,\Omega$，

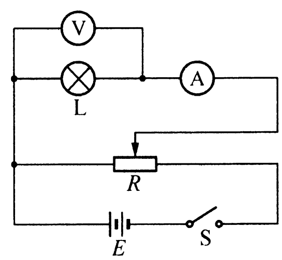


图 12－2－4

答案 (1) 如图 12－2－4 所示

(2) ① 0.10 A ② 0.24 A ③ 2.0 V ④ 0.27 V （8.3±0.1）Ω和（2.7±0.1）Ω，如填为（2.7±0.1）Ω和（8.3±0.1）Ω也行

考点伸展

2.（2019 全国理综Ⅱ卷）某小组利用图 12－2－5 所示的电路，研究硅二极管在恒定电流条件下的正向电压 U 与温度 t 的关系，图中 V_1 和 V_2 为理想电压表；R 为滑动变阻器，R_0 为定值电阻（阻值 100 Ω）；S 为开关，E 为电源。实验中二极管置于控温炉内，控温炉内的温度 t 由温度计（图中未画出）测出。图 12－2－6 所示是该小组在恒定电流为 50.0 μA 时得到的某硅二极管 $U-t$ 关系曲线。回答下列问题：

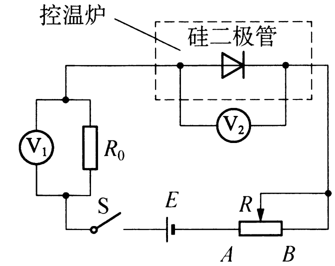


图 12－2－5

（1）实验中，为保证流过二极管的电流为 50.0 μA，应调节滑动变阻器 R，使电压表Ⓥ₁的示数为 $U_1=$ ________ mV；根据图 12－2－6 可知，当控温炉内的温度 t 升高时，硅二极管正向电阻________（填"变大"或"变小"），电压表Ⓥ₁示数________（填"增大"或"减小"），此时应将 R 的滑片向________（填"A"或"B"）端移动，以使 V_1 示数仍为 U_1。

（2）由图 12－2－6 可以看出 U 与 t 呈线性关系，硅二极管可以作为测温传感器，该硅二极管的测温灵敏度为 $\left|\frac{\Delta U}{\Delta t}\right|=$ ________ $\times 10^{-3}$ V/℃（保留 2 位有效数字）。

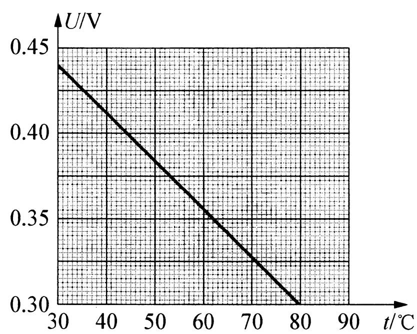


图 12－2－6

3. 2015 年四川理综卷第 8 题

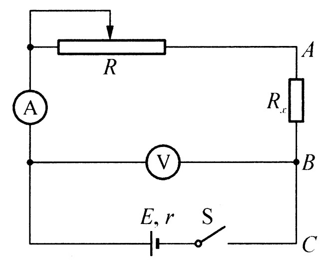


图 12-3-1

用实验测一电池的内阻 r 和一待测电阻的阻值 R_x。已知电池的电动势约 6 V，电池内阻和待测电阻阻值都为数十欧。可选用的实验器材有：

电流表 A_1(量程 0～30 mA)；

电流表 A_2(量程 0～100 mA)；

电压表 V(量程 0～6 V)；

滑动变阻器 R_1(阻值 0～5 Ω)；

滑动变阻器 R_2(阻值 0～300 Ω)；

开关 S 一个，导线若干条。

某同学的实验过程如下：

Ⅰ. 设计如图 12-3-1 所示的电路图，正确连接电路。

Ⅱ. 将 R 的阻值调到最大，闭合开关，逐次调小 R 的阻值，测出多组 U 和 I 的值，并记录。以 U 为纵轴，I 为横轴，得到如图 12-3-2 所示的图线。

Ⅲ. 断开开关，将 R_x 改接在 B、C 之间，A 与 B 直接相连，其他部分保持不变。重复Ⅱ的步骤，得到另一条 $U-I$ 图线，图线与横轴 I 的交点坐标为 $(I_0, 0)$，与纵轴 U 的交点坐标为 $(0, U_0)$。

回答下列问题：

① 电流表应选用________，滑动变阻器应选用________；

② 由图 12-3-2 的图线，得电源内阻 $r=$________Ω；

③ 用 I_0、U_0 和 r 表示待测电阻的关系式 $R_x=$________，代入数值可得 R_x；

④ 若电表为理想电表，R_x 接在 B、C 之间与接在 A、B 之间，滑动变阻器滑片都从最大阻值位置调到某同一位置，两种情况相比，电流表示数变化范围________，电压表示数变化范围________。(选填“相同”或“不同”)

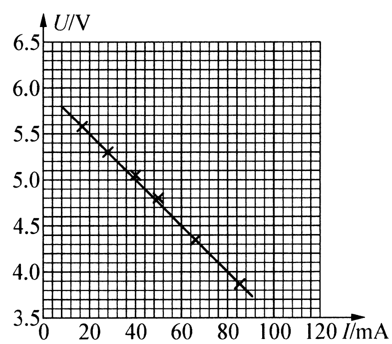


图 12-3-2

思路点拨

1. 电学仪器的选择的一般步骤：先取出实验提供的唯一性器材，根据测量的要求估算电路中的电流电压值，选择合适量程的电表，滑动变阻器阻值的选择要根据测量电路的要求，一般分压接法选择阻值相对较小的变阻器，限流接法选择阻值相对较大的变阻器。

2. 根据实验数据画出的 $U-I$ 图线，图线与纵轴 U 的交点坐标数值即为被测电源的电动势，图线斜率绝对值即为电源的内阻。

3. 当改接电路后，将待测电阻与电源视为整体，即为一“等效电源”，此时图线的斜率为等效

电源的内阻。

分析与解答

① 根据题设条件中电池的电动势约为 6 V，电池内阻和待测电阻阻值都为数十欧，可估算出电路中的电流为数十毫安，因此电流表应选用 A_2，为保证电路正常工作，以及方便调节，多测量几组数据，滑动变阻器应选用 R_2。

② 根据图 12-3-1 电路结构可知，电压表测量了电路的路端电压，电流表测量了电路的总电流，因此图 12-3-2 中，图线斜率绝对值即为电源的内阻，有：$r=|k|=\left|\frac{5.5-4.5}{(60-20)\times10^{-3}}\right|\Omega=25\ \Omega$。

③ 当改接电路后，将待测电阻与电源视为整体，即为一"等效电源"，此时图线的斜率为等效电源的内阻，因此有：$r'=r+R_x=|k'|=\frac{U_0-0}{I_0-0}$，解得：$R_x=\frac{U_0}{I_0}-r$。

④ 若电表为理想电表，R_x 接在 B、C 之间与接在 A、B 之间，电路的总电阻可变范围不变，因此电流表的示数变化范围相同，R_x 接在 B、C 之间时，电压表测量的是滑动变阻器两端的电压，而 R_x 接在 A、B 之间时，电压表测量的是滑动变阻器与 R_x 两端电压的和，由于对应某一滑动变阻器阻值时，电路的电流相同，因此电压表的读数不同，所以电压表示数变化范围也不同。

答案：① A_2　R_2　② 25　③ $\frac{U_0}{I_0}-r$　④ 相同　不同

考点伸展

3.（2018 年江苏物理卷）一同学测量某干电池的电动势和内阻。

（1）如图 12-3-3 所示是该同学正准备接入最后一根导线（图中虚线所示）时的实验电路。请指出图中在器材操作上存在的两个不妥之处：________________；________________。

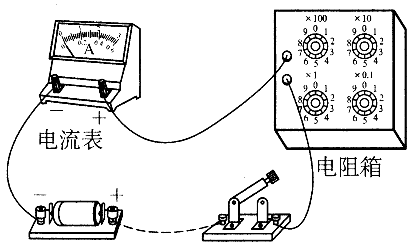


图 12-3-3

（2）实验测得的电阻箱阻值 R 和电流表示数 I，以及计算的 $\frac{1}{I}$ 数据见下表：

根据表中数据，在答题卡的方格纸上作出 $R-\frac{1}{I}$ 关系图象。由图象可计算出该干电池的电动势为________V；内阻为________Ω。

R/Ω	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0
I/A	0.15	0.17	0.19	0.22	0.26
$\frac{1}{I}/A^{-1}$	6.7	6.0	5.3	4.5	3.8

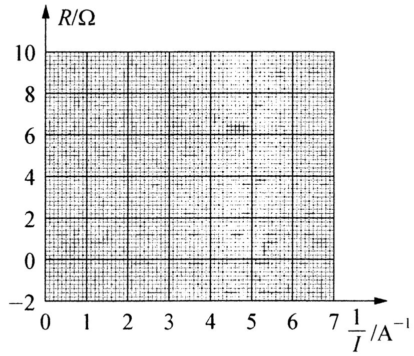


图 12－3－4

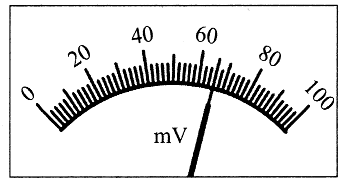


图 12－3－5

(3) 为了得到更准确的测量结果，在测出上述数据后，该同学将一只量程为 100 mV 的电压表并联在电流表的两端。调节电阻箱，当电流表的示数为 0.33 A 时，电压表的指针位置如图 12－3－5所示，则该干电池的电动势应为________V；内阻应为________Ω。

4. 2019 年全国理综Ⅲ卷第 23 题

某同学欲将内阻为 98.5 Ω、量程为 100 μA 的电流表改装成欧姆表并进行刻度和校准，要求改装后欧姆表的 15 kΩ 刻度正好对应电流表表盘的 50 μA 刻度。可选用的器材还有：定值电阻 R_0（阻值 14 kΩ），滑动变阻器 R_1（最大阻值 1500 Ω），滑动变阻器 R_2（最大阻值 500 Ω），电阻箱（0～99 999.9 Ω），干电池（$E=1.5$ V，$r=1.5$ Ω），红、黑表笔和导线若干。

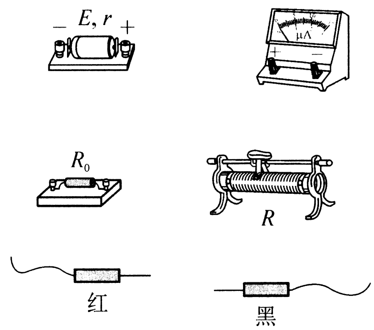


图 12－4－1

（1）欧姆表设计

将图 12－4－1 中的实物连线组成欧姆表。欧姆表改装好后，滑动变阻器 R 接入电路的电阻应为________Ω；滑动变阻器选________（填“R_1”或“R_2”）。

（2）刻度欧姆表表盘

通过计算，对整个表盘进行电阻刻度，如图 12－4－2 所示。表盘上 a、b 处的电流刻度分别为 25 和 75，则 a、b 处的电阻刻度分别为________、________。

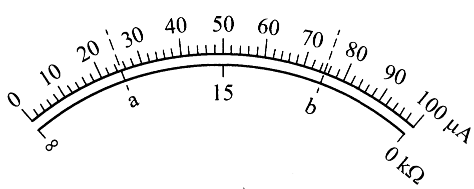


图 12－4－2

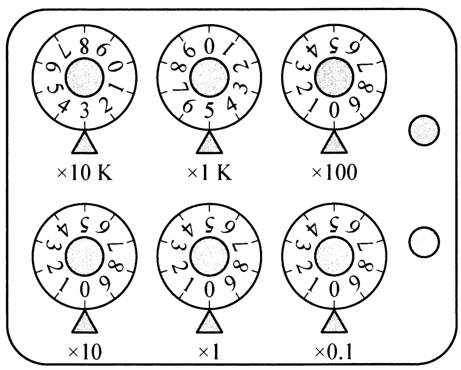


图 12－4－3

（3）校准

红、黑表笔短接，调节滑动变阻器，使欧姆表指针指向________kΩ 处；将红、黑表笔与电阻箱连接，记录多组电阻箱接入电路的电阻值及欧姆表上对应的测量值，完成校准数据测量。若校准某刻度时，电阻箱旋钮位置如图 12－4－3 所示，则电阻箱接入的阻值为________Ω。

思路点拨

1. 根据多用表欧姆挡的原理为全电路欧姆定律，把表头指示的电流值转换成电阻值。当两表笔短接时，相当于待测电阻为零，电流表指针指向满偏，则当电流表半偏时，显然回路总电阻增加一倍，即多用表欧姆挡表盘中央刻度值等于欧姆挡的内阻。

2. 根据多用电表原理可知，欧姆挡在使用前必须要两表笔短接调零，相当于接入一个“零电

阻”进行校准。

分析与解答

本题考查多用电表的欧姆挡的原理、电路与使用方法等知识点，考查电阻箱的使用、仪器选择能力。

(1) 连线如图 12-4-4：

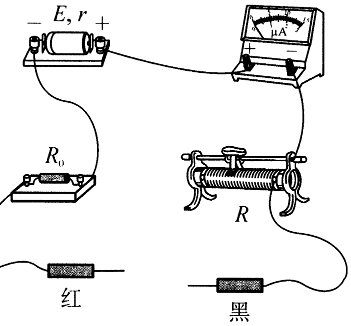


图 12-4-4

根据欧姆表的改装原理，当电流计满偏时，则 $I_g=\dfrac{E}{r+R_0+R}$，解得 $R=900\ \Omega$；为了滑动变阻器的安全，则滑动变阻器选择 R_1；

(2) 在 a 处，$\dfrac{1}{4}I_g=\dfrac{E}{r+R_0+R+R_{xa}}$，解得 $R_{xa}=45\ \text{k}\Omega$；在 b 处，则 $\dfrac{3}{4}I_g=\dfrac{E}{r+R_0+R+R_{xb}}$，解得 $R_{xb}=5\ \text{k}\Omega$；

(3) 校准：红黑表笔短接，调节滑动变阻器，使欧姆表指针指到 0 kΩ 处；由图可知，电阻箱接入的电阻为：$R=35\,000.0\ \Omega$。

答案：(1) 如上图　900　R_1　(2) 45　5　(3) 0　35 000.0

考点伸展

4. (2017 年全国理综Ⅲ卷第 23 题)图 12-4-5 为某同学组装完成的简易多用电表的电路图。图中 E 是电池；R_1、R_2、R_3、R_4 和 R_5 是固定电阻，R_6 是可变电阻；表头 G 的满偏电流为 250 μA，内阻为 480 Ω。虚线方框内为换挡开关，A 端和 B 端分别与两表笔相连。该多用电表有 5 个挡位，5 个挡位为：直流电压 1 V 挡和 5 V 挡，直流电流 1 mA 挡和 2.5 mA 挡，欧姆×100 Ω 挡。

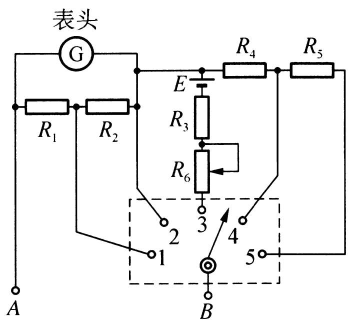


图 12-4-5

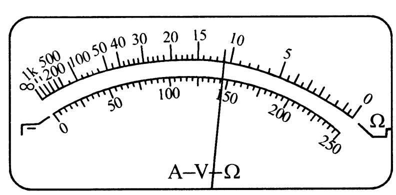


图 12-4-6

(1) 图 12-4-5 中的 A 端与________(选填“红”或“黑”)色表笔相连接。

(2) 关于 R_6 的使用,下列说法中正确的是________(填正确答案标号)。

A. 在使用多用电表之前,调整 R_6 使电表指针指在表盘左端电流“0”位置

B. 使用欧姆挡时,先将两表笔短接,调整 R_6 使电表指针指在表盘右端电阻“0”位置

C. 使用电流挡时,调整 R_6 使电表指针尽可能指在表盘右端电流最大位置

(3) 根据题给条件可得 $R_1+R_2=$ ________Ω, $R_4=$ ________Ω。

(4) 某次测量时该多用电表指针位置如图 12-4-6 所示。若此时 B 端是与“1”相连的,则多用电表读数为________;若此时 B 端是与“3”相连的,则读数为________;若此时 B 端是与“5”相连的,则读数为________。(结果均保留 3 位有效数字)

5. 2013 年山东理综卷第 21 题

霍尔效应是电磁基本现象之一，近期我国科学家在该领域的实验研究中取得了突破性进展。如图 12 - 5 - 1 所示，在一矩形半导体薄片的 P、Q 间通入电流 I，同时外加与薄片垂直的磁场 B，在 M、N 间出现电压 U_H，这个现象称为霍尔效应，U_H 称为霍尔电压，且满足 $U_H = k\frac{IB}{d}$，式中 d 为薄片的厚度，k 为霍尔系数。某同学通过实验来测定该半导体薄片的霍尔系数。

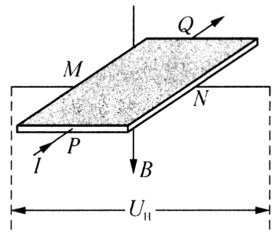


图 12 - 5 - 1

① 若该半导体材料是空穴（可视为带正电粒子）导电，电流与磁场方向如图 12 - 5 - 1 所示，该同学用电压表测量 U_H 时，应将电压表的"＋"接线柱与________（选填"M"或"N"）端通过导线相连。

② 已知薄片厚度 $d = 0.40\,\text{mm}$，该同学保持磁感应强度 $B = 0.10\,\text{T}$ 不变，改变电流 I 的大小，测量相应的 U_H 值，记录数据如下表所示。

$I/\times10^{-3}$ A	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0	18.0
$U_H/\times10^{-3}$ V	1.1	1.9	3.4	4.5	6.2	6.8

根据表中数据在给定区域内画出 $U_H - I$ 图线，利用图线求出该材料的霍尔系数为________$\times10^{-3}\ \text{V}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$（保留 2 位有效数字）。

③ 该同学查阅资料发现，使半导体薄片中的电流反向再次测量，取两个方向测量的平均值，可以减小霍尔系数的测量误差，为此该同学设计了如图 12 - 5 - 2 所示的测量电路，S_1、S_2 均为单刀双掷开关，虚线框内为半导体薄片（未画出）。为使电流从 Q 端流入，P 端流出，应将 S_1 掷向________（填"a"或"b"），S_2 掷向________（填"c"或"d"）。

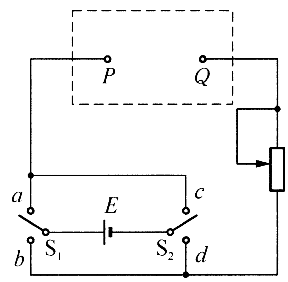


图 12 - 5 - 2

为了保证测量安全，该同学改进了测量电路，将一合适的定值电阻串联在电路中。在保持其他连接不变的情况下，该定值电阻应串联在相邻器件________和________（填器件代号）之间。

思路点拨

1. 霍尔元件是一种重要的磁传感器，利用霍尔效应制成，霍尔电压的正负端可以根据电流方向和磁场方向结合左手定则判定。

2. 利用实验数据点描绘实验图线应注意使图线尽可能多地通过数据点，不在线上的点均匀分布在线的两侧，误差较大的点予以舍去。

3. 根据题设的电路结构和要求的电流方向，选择开关的掷向，为保证测量安全，可以在干路上串联定值电阻，以减小电路中的电流。

分析与解答

① 由于导电空穴为带正电的粒子，由电流方向和磁场方向结合左手定则可判断出正粒子向 M 板偏转，故 M 板的电势高，电压表的"+"接线柱应与 M 端连接。

② 根据表格数据，在坐标纸上描点、连线，注意使图线尽可能多地通过数据点，不在线上的点均匀分布在线的两侧，误差较大的点予以舍去。作图如图 12-5-3 所示：

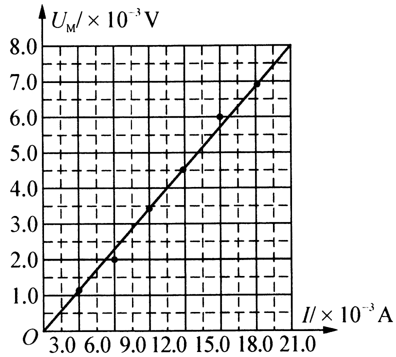


图 12-5-3

由题意 $U_H=k\dfrac{IB}{d}$ 知 $\dfrac{U_H}{I}=k\dfrac{B}{d}$，即图线的斜率表示 $k\dfrac{B}{d}$，将已知数据代入可求得 $k=1.5\times10^{-3}\ \text{V}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$

③ 为使电流从 Q 端流入，P 端流出，应将 S_1 掷向"b"，S_2 掷向"c"。为了保证测量安全，可以将一合适的定值电阻与电源串联连接在电路中。在保持其他连接不变的情况下，该定值电阻应串联在相邻器件 S_1 和 E 之间。

答案 ① M ② 如下图所示 1.5(1.4 或 1.6) ③ b c S_1 E(或 S_2，E)

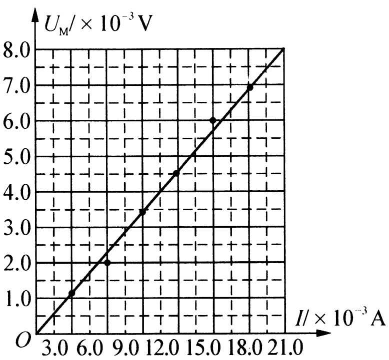


图 12-5-4

考点伸展

5.（2017 年江苏物理卷第 11 题）某同学通过实验制作一个简易的温控装置，实验原理电路图如图 12-5-5 所示，继电器与热敏电阻 R_t、滑动变阻器 R 串联接在电源 E 两端，当继电器线圈中的电流超过 15 mA 时，衔铁被吸合，加热器停止加热，实现温控。继电器线圈的电阻约为 20 Ω，热敏电阻的阻值 R_t 与温度 t 的关系如下表所示

t/℃	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
R_t/Ω	199.5	145.4	108.1	81.8	62.9	49.1

(1) 提供的实验器材有：电源 E_1(3 V，内阻不计)、电源 E_2(6 V，内阻不计)、滑动变阻器 R_1(0～200 Ω)、滑动变阻器 R_2(0～500 Ω)、热敏电阻 R_t，继电器、电阻箱(0～999.9 Ω)、开关 S、导线若干。

为使该装置实现对 30～80℃之间任一温度的控制，电源 E 应选用________(选填"E_1"或

“E_2”），滑动变阻器 R 应选用________（选填“R_1”或“R_2”）。

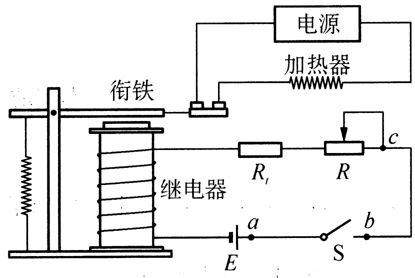


图 12-5-5

（2）实验中发现电路不工作。某同学为排查电路故障，用多用电表测量各接点间的电压，则应将如图 12-5-6 所示的选择开关旋至________（选填“A”、“B”、“C”或“D”）。

（3）合上开关 S，用调节好的多用电表进行排查，在图 12-5-5 中，若只有 b、c 间断路，则应发现表笔接到 a、b 时指针________（选填“偏转”或“不偏转”），接到 a、c 时指针________（选填“偏转”或“不偏转”）。

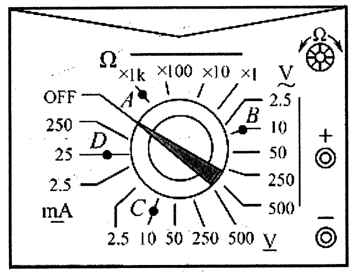


图 12-5-6

（4）排除故障后，欲使衔铁在热敏电阻为 50℃时被吸合，下列操作步骤中正确顺序是________（填写各步骤前的序号）。

① 将热敏电阻接入电路；

② 观察到继电器的衔铁被吸合；

③ 断开开关，将电阻箱从电路中移除；

④ 合上开关，调节滑动变阻器的阻值；

⑤ 断开开关，用电阻箱替换热敏电阻，将阻值调至 108.1 Ω。

专题十三　设计实验

1. 2017 年全国理综Ⅱ卷第 22 题

某同学研究在固定斜面上运动物体的平均速度、瞬时速度和加速度之间的关系。使用的器材有：斜面、滑块、长度不同的矩形挡光片、光电计时器。

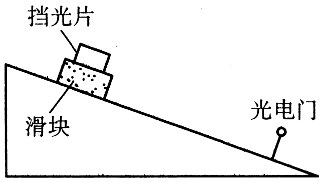


图 13-1-1

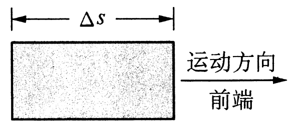


图 13-1-2

实验步骤如下：

① 如图 13-1-1 所示，将光电门固定在斜面下端附近；将一挡光片安装在滑块上，记下挡光片前端相对于斜面的位置，令滑块从斜面上方由静止开始下滑；

② 当滑块上的挡光片经过光电门时，用光电计时器测得光线被挡光片遮住的时间 Δt；

③ 用 Δs 表示挡光片沿运动方向的长度，如图 13-1-2 所示，$\bar{v}$表示滑块在挡光片遮住光线的 Δt 时间内的平均速度大小，求出$\bar{v}$；

④ 将另一挡光片换到滑块上，使滑块上的挡光片前端与①中的位置相同，令滑块由静止开始下滑，重复步骤②、③；

⑤ 多次重复步骤④；

⑥ 利用实验中得到的数据作出$\bar{v}$- Δt 图，如图 13-1-3 所示。

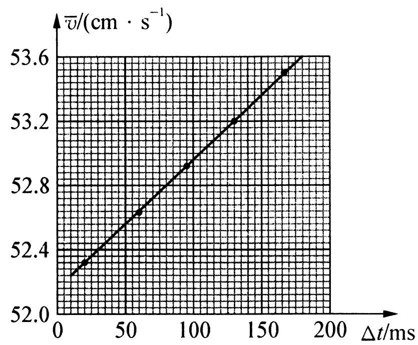


图 13-1-3

完成下列填空：

（1）用 a 表示滑块下滑的加速度大小，用 v_A 表示挡光片前端到达光电门时滑块的瞬时速度大小，则$\bar{v}$与 v_A、a 和 Δt 的关系式为$\bar{v}$=________。

（2）由图 13-1-3 可求得，v_A=________cm/s，a=________cm/s^2。（结果保留 3 位有效数字）

思路点拨

解决本题的关键是掌握匀变速直线运动的运动学公式和推论，并能灵活运用，对于图线问题，一般解题思路是得出物理量之间的关系式，结合图线的斜率和截距进行求解。

（1）题目中提供的是平均速度$\bar{v}$和所用时间 Δt 的关系，根据某段时间内的平均速度等于中间时刻的瞬时速度求出挡光片通过光电门过程中中间时刻的瞬时速度，结合速度公式求出 v 与

v_A、a 和 Δt 的关系式。

(2) 结合 v 与 v_A、a 和 Δt 的关系式，通过图线的斜率和截距求出 v_A 和加速度的大小。

分析与解答

试题分析：(1)设挡光片末端到达光电门的速度为 v，则由速度时间关系可知：$v = v_A + a\Delta t$，且 $\bar{v} = \dfrac{v_A + v}{2}$。

联立解得：$\bar{v} = v_A + \dfrac{1}{2}a\Delta t$。

(2) 由图 13-1-3 可求得 $v_A = 52.1\ \text{cm/s}$，$\dfrac{1}{2}a = \dfrac{53.6 - 52.1}{180 \times 10^{-3}}\ \text{cm/s}^2 \approx 8.3\ \text{cm/s}^2$，即 $a = 16.6\ \text{cm/s}^2$。

答案：(1) $\bar{v} = v_A + \dfrac{1}{2}a\Delta t$　(2) 52.1　16.3(15.8～16.8)

考点伸展

1. (2017 年全国理综Ⅰ卷第 22 题)某探究小组为了研究小车在桌面上的直线运动，用自制“滴水计时器”计量时间。实验前，将该计时器固定在小车旁，如图 13-1-4 所示。实验时，保持桌面水平，用手轻推一下小车。在小车运动过程中，滴水计时器等时间间隔地滴下小水滴，图 13-1-5 记录了桌面上连续的 6 个水滴的位置。(已知滴水计时器每 30 s 内共滴下 46 个小水滴)

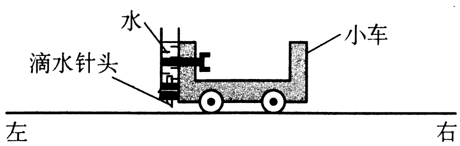


图 13-1-4

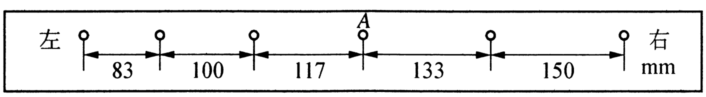


图 13-1-5

(1) 由图 13-1-5 可知，小车在桌面上是________(填“从右向左”或“从左向右”)运动的。

(2) 该小组同学根据图 13-1-5 的数据判断出小车做匀变速运动。小车运动到图 13-1-5 中 A 点位置时的速度大小为________m/s，加速度大小为________m/s^2。(结果均保留 2 位有效数字)

2. 2017年全国理综Ⅱ卷第23题

某同学利用如图13-2-1所示的电路测量一微安表(量程为100 μA,内阻大约为2500 Ω)的内阻。可使用的器材有:两个滑动变阻器 R_1、R_2(其中一个阻值为20 Ω,另一个阻值为2000 Ω);电阻箱 R_z(最大阻值为99 999.9 Ω);电源 E(电动势约为1.5 V);单刀开关 S_1 和 S_2。C、D 分别为两个滑动变阻器的滑片。

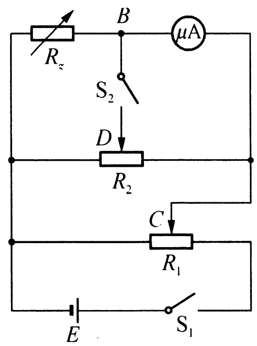


图13-2-1

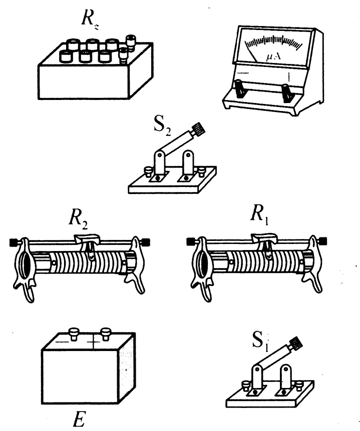


图13-2-2

(1) 按原理图13-2-1将图13-2-2中的实物连线。

(2) 完成下列填空:

① R_1 的阻值为________Ω(选填"20"或"2000")。

② 为了保护微安表,开始时将 R_1 的滑片 C 滑到接近图13-2-1中的滑动变阻器的________端(选填"左"或"右")对应的位置;将 R_2 的滑片 D 置于中间位置附近。

③ 将电阻箱 R_z 的阻值置于2500.0 Ω,接通 S_1。将 R_1 的滑片置于适当位置,再反复调节 R_2 的滑片 D 的位置。最终使得接通 S_2 前后,微安表的示数保持不变,这说明 S_2 接通前 B 与 D 所在位置的电势________(选填"相等"或"不相等")。

④ 将电阻箱 R_z 和微安表位置对调,其他条件保持不变,发现将 R_z 的阻值置于2601.0 Ω时,在接通 S_2 前后,微安表的示数也保持不变。待测微安表的内阻为________Ω(结果保留到个位)。

(3) 写出一条提高测量微安表内阻精度的建议:________________。

思路点拨

对于实验题,要弄清楚实验目的、实验原理以及数据处理、误差分析等问题,一般的实验设计、实验方法都是根据教材上给出的实验方法进行拓展、延伸,所以一定要熟练掌握教材中的重要实验。对于实验仪器的选取一般要求满足安全性原则、准确性原则和操作方便原则的要求。本题是思维要求较高的电学分析题,题中已经给出具体的操作步骤,因此在解决这一类题的关键是搞清楚每一步实验操作的理由。

(1) 从实验电路图可以看出,滑动变阻器采用的是分压接法,而且微安表的电阻较大,因此,

滑动变阻器应该选用较小的电阻；

（2）测量部分是一个“桥式”电路，B、D之间就是一个“电桥”，开关闭合前后，要保证微安表示数不变，显然，这个桥的通断对电路没有影响，因此B、D两点是等电势的。在一条支路中，电势的降落与电阻成正比，则根据电压和电流的关系及B、D两点是等电势的条件，可以求出微安表的电阻。

分析与解答

（1）实物连线如图 13－2－3 所示。

（2）① 滑动变阻器R_1要接成分压电路，则要选择阻值较小的 20 Ω 的滑动变阻器。

② 为了保护微安表，开始时将R_1的滑片C滑到接近图 13－2－3中滑动变阻器的左端对应的位置。

③ 将电阻箱R_z的阻值置于 2500.0 Ω，接通S_1；将R_1的滑片置于适当位置，再反复调节R_2的滑片D的位置；最终使得接通S_2前后，微安表的示数保持不变，这说明S_2接通前后在BD中无电流流过，可知B与D所在位置的电势相等。

④ 设滑片P两侧电阻分别为R_{21}和R_{22}，因B与D所在位置的电势相等，可知：$\frac{R_{z1}}{R_{21}}=\frac{R_A}{R_{22}}$；同理当$R_z$和微安表对调后，仍有：$\frac{R_A}{R_{21}}=\frac{R_{z2}}{R_{22}}$；联立两式解得：$R_A=\sqrt{R_{z1}R_{Z2}}=\sqrt{2500\times 2601}\ \Omega=2550\ \Omega$。

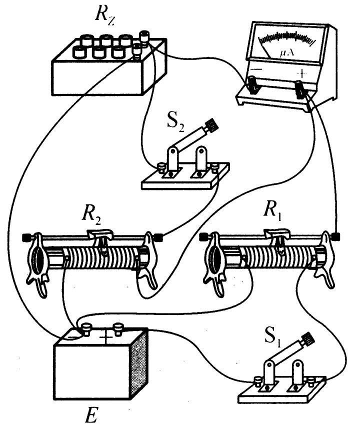


图 13－2－3

（3）为了提高测量精度，调节R_1上的分压，尽可能使微安表示数接近满量程。

答案：（1）连线如图 13－2－3 所示 （2）① 20 ② 左 ③ 相等 ④ 2550 （3）调节R_1上的分压，尽可能使微安表示数接近满量程

考点伸展

2.（2019 年全国理综Ⅰ卷）某同学要将一量程为 250 μA 的微安表改装为量程为 20 mA 的电流表。该同学测得微安表内阻为 1200 Ω，经计算后将一阻值为R的电阻与该微安表连接，进行改装。然后利用一标准毫安表，根据图 13－2－4 所示电路对改装后的电表进行检测（虚线框内是改装后的电表）。

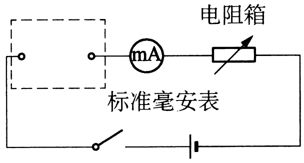


图 13－2－4

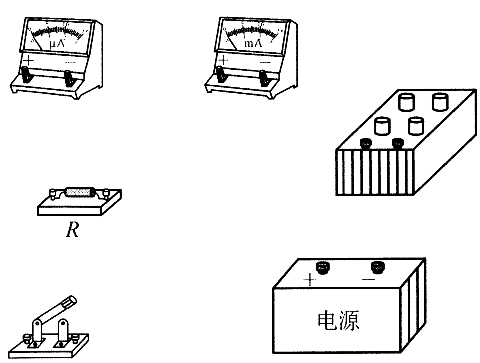


图 13－2－5

(1) 根据图 13 - 2 - 4 和题给条件，将 13 - 2 - 5 中的实物连接。

(2) 当标准毫安表的示数为 16.0 mA 时，微安表的指针位置如图 13 - 2 - 6 所示，由此可以推测出改装的电表量程不是预期值，而是________。(填正确答案标号)

A．18 mA　　B．21 mA　　C．25 mA　　D．28 mA

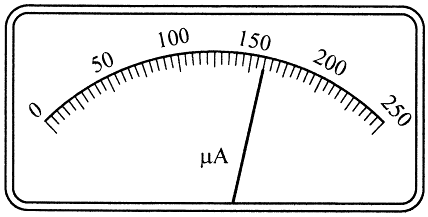


图 13 - 2 - 6

(3) 产生上述问题的原因可能是________。(填正确答案标号)

A．微安表内阻测量错误，实际内阻大于 1200 Ω

B．微安表内阻测量错误，实际内阻小于 1200 Ω

C．R 值计算错误，接入的电阻偏小

D．R 值计算错误，接入的电阻偏大

(4) 要达到预期目的，无论测得的内阻值是否正确，都不必重新测量，只需要将阻值为 R 的电阻换为一个阻值为 kR 的电阻即可，其中 $k=$________。

第五部分
选考模块

专题十四　选考模块

1. 2017 年 4 月浙江选考卷第 15 题

一列向右传播的简谐横波，当波传到 $x=2.0\ \text{m}$ 处的 P 点时开始计时，该时刻波形如图 14-1-1 所示。$t=0.9\ \text{s}$ 时，观测到质点 P 第三次到达波峰位置。下列说法中正确的是(　　)。

A. 波速为 $0.5\ \text{m/s}$

B. 经 $1.4\ \text{s}$ 质点 P 运动的路程为 $70\ \text{cm}$

C. $t=1.6\ \text{s}$ 时，$x=4.5\ \text{m}$ 处的质点 Q 第三次到达波谷

D. 与该波发生干涉的另一列简谐横波的频率一定为 $2.5\ \text{Hz}$

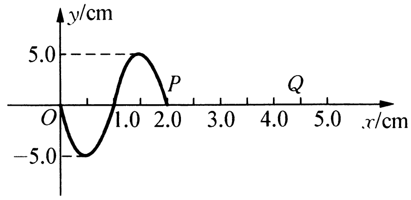


图 14-1-1

思路点拨

本题考查机械波的相关知识。由图可知，质点的起振方向沿 y 轴正方向，结合题意，$t=0.9\ \text{s}$ 时，质点 P 第三次到达波峰位置，即 $\left(2+\frac{1}{4}\right)T=t$，可知质点的振动周期即波的周期，再由图可知波长的值，即可求出波速；由于 $t=0$ 时刻质点 P 刚好经过平衡位置，因此只要知道之后 P 经历了多少个四分之一周期(即 $n\cdot\frac{T}{4}$)，便可知道 P 运动的路程为 $n\cdot A$；由于波传播的是波形，离质点 Q 最近的波谷对应的平衡位置为 $x=0.5\ \text{m}$，$x=0.5\ \text{m}$ 处的波形传播到 $x=4.5\ \text{m}$ 处时 Q 第一次到达波谷，再经二个周期 Q 第三次到达波谷；由于发生波的干涉的条件是两列波的频率相等，故知道了波的频率，便可知与之发生干涉的另一列波的频率是多少。

分析解答

根据质点的振动是由前一个质点带动后一个质点的振动可知，介质中质点的起振方向沿 y 轴正方向，在 $t=0.9\ \text{s}$ 时 P 点第三次到达波峰，有 $\left(2+\frac{1}{4}\right)T=0.9\ \text{s}$，解得周期 $T=0.4\ \text{s}$，由图可知波长 $\lambda=2\ \text{m}$，所以波速 $v=\frac{\lambda}{T}=5\ \text{m/s}$，选项 A 错；由于 $1.4\ \text{s}=14\times\frac{T}{4}$，每 $\frac{T}{4}$ 质点运动的路程为 $A=5.0\ \text{cm}$，且 $t=0$ 时刻质点 P 刚好经过平衡位置，所以经 $1.4\ \text{s}$ 质点 P 运动的路程为 $14A=70\ \text{cm}$，选项 B 正确；离质点 Q 最近的波谷对应的平衡位置为 $x=0.5\ \text{m}$，$x=0.5\ \text{m}$ 处的波形传播到 $x=4.5\ \text{m}$ 处时质点 Q 第一次到达波谷，该过程经历 $t=\frac{4.5-0.5}{5}\ \text{s}=0.8\ \text{s}$，再经过 $2T=0.8\ \text{s}$，质点 Q 第三次到达波谷，故 $t=1.6\ \text{s}$ 时，质点 Q 第三次到达波谷，选项 C 正确；要发生干涉现象，另一列波的频率一定要与该波的频率相同，即 $f=\frac{1}{T}=2.5\ \text{Hz}$，选项 D 正确。本题正确答案是：BCD。

考点伸展

1.（2019 年全国理综Ⅰ卷）一简谐横波沿 x 轴正方向传播，在 $t=\frac{T}{2}$ 时刻，该波的波形图如图 14－1－2 所示，P、Q 是介质中的两个质点。图 14－1－3 表示介质中某质点的振动图象。下列说法中正确的是（　　）。

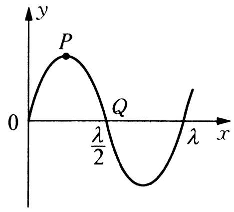


图 14－1－2

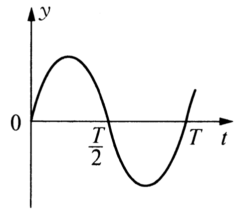


图 14－1－3

A．质点 Q 的振动图象与图 14－1－3 相同
B．在 $t=0$ 时刻，质点 P 的速率比质点 Q 的大
C．在 $t=0$ 时刻，质点 P 的加速度的大小比质点 Q 的大
D．平衡位置在坐标原点的质点的振动图象如图 14－1－3 所示
E．在 $t=0$ 时刻，质点 P 与其平衡位置的距离比质点 Q 的大

2. 2015 年上海物理卷第 9 题

如图 14-2-1 所示，长为 h 的水银柱将上端封闭的玻璃管内气体分隔成两部分，A 处管内外水银面相平。将玻璃管缓慢向上提升 H 高度（管下端未离开水银面），上下两部分气体的压强变化分别为 Δp_1 和 Δp_2，体积变化分别为 ΔV_1 和 ΔV_2。已知水银密度为 ρ，玻璃管截面积为 S，则（　　）。

A. Δp_2 一定等于 Δp_1

B. ΔV_2 一定等于 ΔV_1

C. Δp_2 与 Δp_1 之差为 ρgh

D. ΔV_2 与 ΔV_1 之和为 HS

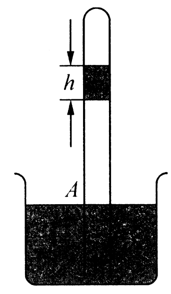


图 14-2-1

思路点拨

本题考查气体的实验定律，涉及气体压强的计算、玻意耳定律的应用等内容。玻璃管上提时，可先假设 A 处的水银不上升、长为 h 的水银柱和玻璃管一起“锁住”，则管下面部分的气体体积增大、压强变小。“解锁”以后可知 A 处有部分水银进入玻璃管，上部气体的体积也增大，再具体分析比较 ΔV_1、ΔV_2 的大小。解答时还需注意两点：(1)玻璃管缓慢向上提升意味着气体做等温变化；(2)由连通器原理可知，管内、外液体深度相同位置的压强相等。

分析解答

气体状态在变化过程中，玻璃管中水银柱上部的气体压强始终比下部的气体压强小 ρgh，故压强变化 $\Delta p_1=\Delta p_2$，选项 A 正确、C 错误。对上部气体由玻意耳定律得 $p_1V_1=p_1'V_1'$，气体的体积变化 $\Delta V_1=V_1'-V_1=\frac{-\Delta p_1}{p_1'}V_1$，同理可求得 $\Delta V_2=\frac{-\Delta p_2}{p_2'}V_2$。设末状态管中水银面比管外高 Δh，有 $p_2'=p_0-\rho g\Delta h$，$p_1'=p_0-\rho g\Delta h-\rho gh$，根据 ΔV_1 和 ΔV_2 的表达式，比较可知两者不一定相等，B 选项错误。玻璃管缓慢上提 H 高度，有部分水银进入玻璃管，所以 ΔV_2 与 ΔV_1 之和小于 HS，D 选项错误。本题的答案为 A。

考点伸展

2.（2019 年全国理综Ⅱ卷）如图 14-2-2 所示，一容器由横截面积分别为 $2S$ 和 S 的两个汽缸连通而成，容器平放在地面上，汽缸内壁光滑。整个容器被通过刚性杆连接的两活塞分隔成三部分，分别充有氢气、空气和氮气。平衡时，氮气的压强和体积分别为 p_0 和 V_0，氢气的体积为 $2V_0$，空气的压强为 p。现缓慢地将中部的空气全部抽出，抽气过程中氢气和氮气的温度保持不变，活塞没有到达两汽缸的连接处，求：

(1) 抽气前氢气的压强；

(2) 抽气后氢气的压强和体积。

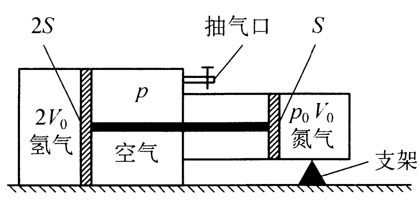


图 14-2-2

3. 2014 年重庆理综卷第 11 题

打磨某剖面如图 14-3-1 所示的宝石时，必须将 OP、OQ 边与轴线的夹角 θ 切割在 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 的范围内，才能使从 MN 边垂直入射的光线，在 OP 边和 OQ 边都发生全反射（仅考虑如图所示的光线第一次射到 OP 边并反射到 OQ 边后射向 MN 边的情况），则下列判断中正确的是（　　）。

A. 若 $\theta > \theta_2$，光线一定在 OP 边发生全反射

B. 若 $\theta > \theta_2$，光线会从 OQ 边射出

C. 若 $\theta < \theta_1$，光线会从 OP 边射出

D. 若 $\theta < \theta_1$，光线会在 OP 边发生全反射

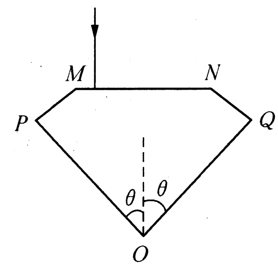


图 14-3-1

思路点拨

本题以加工技术中宝石的切割为背景，考查学生对光的折射、全反射的掌握情况。在 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 的范围内，光线在 OP 边和 OQ 边都发生全反射，说明 θ_1、θ_2 是光线在 OP 边或 OQ 边发生全反射的临界情况。分析的关键是要确定 θ_1（或 θ_2）对应的到底是哪一边的临界情况。

分析解答

设光线在 OP 边的入射角为 α，在 OQ 边的入射角为 β，如图 14-3-2 所示，由几何关系可知 $\alpha = 90° - \theta$，$\beta = 2\theta - \alpha = 3\theta - 90°$。因此当夹角 θ 从 θ_1 增大到 θ_2 时，α 角不断减小，β 角不断增大。所以当 $\theta = \theta_1$ 时，β 角刚达到临界角，光在 OQ 边恰好发生全反射；当 $\theta = \theta_2$ 时，α 角刚减小到临界角，光还能在 OP 边发生全反射；当 $\theta > \theta_2$ 时，光将从 OP 边射出、不会从 OQ 边射出，选项 A、B 错误。若 $\theta < \theta_1$ 时，光会从 OQ 边射出，在 OP 边仍发生全反射，选项 C 错误，D 正确。本题的答案为 D。

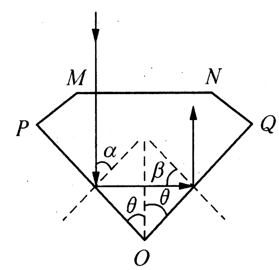


图 14-3-2

考点伸展

3.（2019 年全国理综Ⅰ卷）如图 14-3-3，一艘帆船静止在湖面上，帆船的竖直桅杆顶端高出水面 3 m。距水面4 m的湖底 P 点发出的激光束，从水面出射后恰好照射到桅杆顶端，该出射光束与竖直方向的夹角为 53°（取 $\sin 53° = 0.8$）。已知水的折射率为 $\frac{4}{3}$。

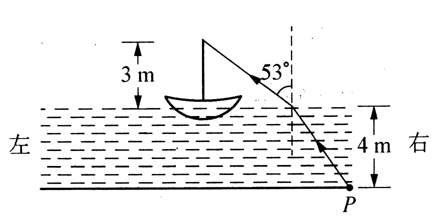


图 14-3-3

（1）求桅杆到 P 点的水平距离；

（2）船向左行驶一段距离后停止，调整由 P 点发出的激光束方向，当其与竖直方向夹角为 45°时，从水面射出后仍然照射在桅杆顶端，求船行驶的距离。

4. 2016 年 10 月浙江选考卷第 15 题

如图 14-4-1 所示为氢原子能级图，氢原子中的电子从 $n=5$ 能级跃迁到 $n=2$ 能级可产生 a 光；从 $n=4$ 能级跃迁到 $n=2$ 能级可产生 b 光。a 光和 b 光的波长分别为 λ_a 和 λ_b，照射到逸出功为 2.29 eV 的金属钠表面均可产生光电效应，遏止电压分别为 U_a 和 U_b，则（　　）。

A. $\lambda_a > \lambda_b$

B. $U_a > U_b$

C. a 光的光子能量为 2.86 eV

D. b 光产生的光电子最大初动能 $E_k = 0.26$ eV

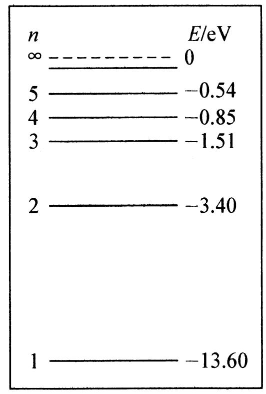


图 14-4-1

思路点拨

本题综合考查原子核物理的内容。依据玻尔的跃迁假设 $h\nu = E_n - E_m$ 可分别求出 a 光和 b 光的光子能量，再结合波长与频率的关系 $\lambda = \frac{c}{\nu}$ 可得 a 光和 b 光的波长大小关系；由爱因斯坦的光电效应方程 $E_{km} = h\nu - W_{逸}$，可得 a 光和 b 光产生的光电子的最大初动能，再由动能定理 $-eU_{遏} = 0 - E_{km}$，可得遏止电压的大小关系。

分析解答

依据玻尔的跃迁假设 $h\nu = E_n - E_m$，可得氢原子中的电子从 $n=5$ 能级跃迁到 $n=2$ 能级产生的 a 光光子能量为 $\Delta E_a = E_5 - E_2 = [-0.54-(-3.40)]$ eV $= 2.86$ eV，电子从 $n=4$ 能级跃迁到 $n=2$ 能级产生的 b 光光子能量为 $\Delta E_b = E_4 - E_2 = [-0.85-(-3.40)]$ eV $= 2.55$ eV，选项 C 正确；光子能量越高则其频率越大，即 $\nu_a > \nu_b$，由波长与频率的关系 $\lambda = \frac{c}{\nu}$，可得 $\lambda_a < \lambda_b$，选项 A 错；由光电效应方程 $E_{km} = h\nu - W_{逸}$，可得 a 光和 b 光产生的光电子的最大初动能分别为 $E_{ka} = (2.86-2.29)$eV $= 0.57$ eV、$E_{kb} = (2.55-2.29)$eV $= 0.26$ eV，选项 D 正确；由动能定理 $-eU_{遏} = 0 - E_{km}$，即 $eU_{遏} = E_{km}$，可得遏止电压的大小关系 $U_a > U_b$，选项 B 正确。本题正确答案是：BCD。

考点伸展

4.（2019 年全国理综Ⅰ卷）氢原子能级示意图如图 14-4-2 所示。光子能量在 1.63 eV～3.10 eV 的光为可见光。要使处于基态（$n=1$）的氢原子被激发后可辐射出可见光光子，最少应给氢原子提供的能量为（　　）。

A. 12.09 eV　　　　B. 10.20 eV

C. 1.89 eV　　　　D. 1.51 eV

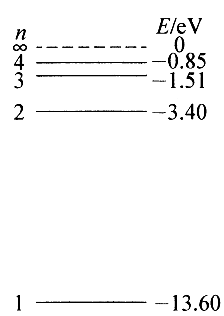


图 14-4-2

5. 2017年4月浙江选考卷第16题

图中给出了"用双缝干涉测量光的波长"实验示意图,双缝 S_1 和 S_2 间距为 0.80 mm,双缝到屏的距离为 0.80 m。波长为 500 nm 的单色平行光垂直入射到双缝 S_1 和 S_2 上,在屏上形成干涉条纹。中心轴线 OO' 上方第 1 条亮纹中心位置在 P_1 处,第 3 条亮纹中心位置在 P_2 处。现有 1 号、2 号虫子分别从 S_1 和 S_2 出发以相同速度沿垂直屏方向飞行,1 号虫子到达屏后,沿屏直线爬行到 P_1,2 号虫子到达屏后,沿屏直线爬行到 P_2。假定两只虫子爬行速率均为 10^{-3} m/s。则下列判断中正确的是(　　)。

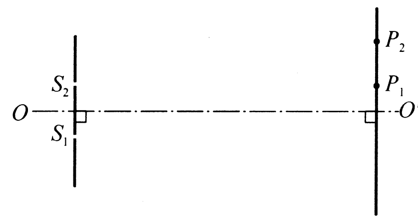


图 14-5-1

A. 1 号虫子运动路程比 2 号短

B. 两只虫子运动的时间差为 0.2 s

C. 两只虫子运动的时间差为 1.0 s

D. 已知条件不够,两只虫子运动时间差无法计算

思路点拨

本题考查以"用双缝干涉测量光的波长"实验为背景的题目。根据题中给定的条件先求出屏上出现相邻两条亮纹中心的间距,再确定第 1、3 条亮纹中心位置 P_1、P_2 距中心轴线 OO' 的距离;之后再求出 1、2 号虫子到达屏后沿直线分别爬行到 P_1、P_2 点的路程及路程差,再结合虫子爬行的速率便可求出两只虫子运动的时间差。

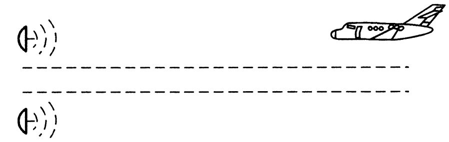
分析解答

根据"用双缝干涉测量光的波长"实验,可知相邻两条亮纹中心的间距 $\Delta x=\dfrac{L}{d}\lambda$,代入题给数据得$\Delta x=0.5$ mm,可见 P_1、P_2 两点距中心轴线 OO' 的距离分别为 0.5 mm 和 1.5 mm;1、2 号虫子分别沿垂直屏方向飞行,到达屏后再沿直线爬行到 P_1、P_2 点的路程分别为 $x_1=(0.4+0.5)\text{mm}=0.9$ mm、$x_2=(1.5-0.4)\text{mm}=1.1$ mm,可见 1 号虫子运动路程比 2 号短 $\Delta x'=0.2$ mm,选项 A 正确;再由 $\Delta t=\dfrac{\Delta x'}{v}=0.2$ s,可见两只虫子运动的时间差为 0.2 s,选项 B 正确。本题正确答案是:AB。

考点伸展

5. (2017 年北京理综卷第 20 题)物理学原理在现代科技中有许多重要应用。例如,利用波的干涉,可将无线电波的干涉信号用于飞机降落的导航。

如图 14-5-2 所示,两个可发射无线电波的天线对称地固定于飞机跑道两侧,它们类似于杨氏干涉实验中的双缝。两天线同时都发出波长为 λ_1 和 λ_2 的无线电波。飞机降落过程中,当接收到 λ_1 和 λ_2 的信号都


图 14-5-2

保持最强时，表明飞机已对准跑道。下列说法中正确的是（　　）。

A．天线发出的两个无线电波必须一样强

B．导航利用了 λ_1 与 λ_2 两个无线电波之间的干涉

C．两个无线电波在空间的强弱分布稳定

D．两个无线电波各自在空间的强弱分布完全重合

6. 2016 年 4 月浙江选考卷第 21 题

在“用双缝干涉测量光的波长”实验中，选用红色滤光片和间距为 0.20 mm 的双缝，双缝与屏的距离为 600 mm。某同学正确操作后，在目镜中看到如图 14-6-1 所示的干涉条纹。换成紫色滤光片正确操作后，使测量头分划板刻线与第 k 级暗条纹中心对齐，在目镜中观测到的是图 14-6-2 中的________（填字母），此时测量头的读数为 25.70 mm。沿同一方向继续移动测量头使分划板刻线与第 $k+5$ 级暗条纹中心对齐，此时测量头标尺如图 14-6-3 所示，其读数是________mm。紫光的波长等于________nm。

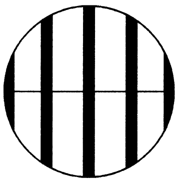


图 14-6-1

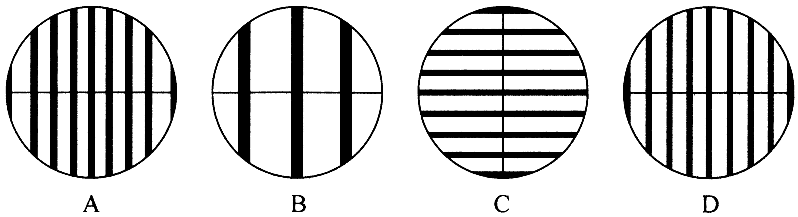


图 14-6-2

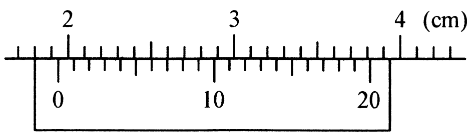


图 14-6-3

思路点拨

1. 干涉光的条纹间距 $\Delta x=\frac{\lambda L}{d}$，其中 λ 为波长，L 为双缝到屏的距离，d 为双缝间的距离。实验装置安装好后，L、d 都已确定，若测得 Δx，则可求得光的波长。

2. 实验的装置如图 14-6-4 所示，注意各元件的安放次序。

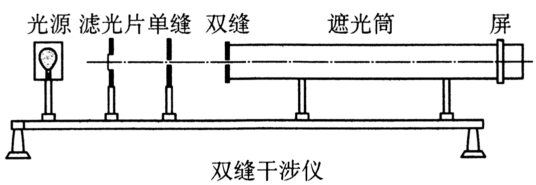


图 14-6-4

3. 不同颜色的光波长不同，红光波长长，紫光波长短，所以用同一装置做实验，紫光的条纹间距小一些。

4. 在测量干涉光的条纹间距时，若测量头分划板刻线与第 1 个亮纹（或暗纹）中心对齐时，读数为 x_1，测量头分划板刻线与第 N 个亮纹（或暗纹）中心对齐时，读数为 x_2，则条纹间距为 $\Delta x=\frac{x_2-x_1}{N-1}$。

分析与解答

红光改为紫光做实验时，条纹依旧为竖条纹，条纹间距变小，而测量头分划板刻线会随目镜的移动而移动，始终处在视图的中心。所以应观察到 D 图。

测量头读数为 19.40 mm。

由 $\Delta x=\dfrac{\lambda L}{d}$，得 $\lambda=\dfrac{\Delta x\cdot d}{L}=420\ \text{nm}$。

答案：D　19.40　420

考点伸展

6.（2019 年全国理综Ⅱ卷）某同学利用图 14－6－5 所示装置测量某种单色光的波长。实验时，接通电源使光源正常发光；调整光路，使得从目镜中可以观察到干涉条纹。回答下列问题：

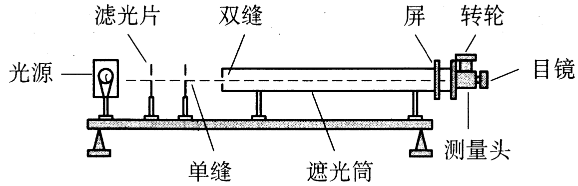


图 14－6－5

（1）若想增加从目镜中观察到的条纹个数，该同学可________；

A．将单缝向双缝靠近

B．将屏向靠近双缝的方向移动

C．将屏向远离双缝的方向移动

D．使用间距更小的双缝

（2）若双缝的间距为 d，屏与双缝间的距离为 l，测得第 1 条暗条纹到第 n 条暗条纹之间的距离为 Δx，则单色光的波长 $\lambda=$________；

（3）某次测量时，选用的双缝的间距为 0.300 mm，测得屏与双缝间的距离为 1.20 m，第 1 条暗条纹到第 4 条暗条纹之间的距离为 7.56 mm。则所测单色光的波长为________nm（结果保留 3 位有效数字）。

考点伸展参考答案

专题一　力与运动

1. BD
2. C
3. A
4. D
5. B
6. AD
7. BD
8. 解：雨滴加速度为 0 时，速度最大。设雨滴 a 的最大速度为 v_m。

由 $mg = kr^2v^2$，$m = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$，解得 $v_m = \sqrt{\frac{4\pi\rho g}{3k}r}$。

同理，大雨滴匀速下落时的速度 $v'_m = \sqrt{\frac{4\pi\rho g}{3k}r'}$，式中大雨滴的半径 r' 由关系式 $\frac{4}{3}\pi r'^3 = 2 \times \frac{4}{3}\pi r^3$，得 $r' = \sqrt[3]{2}r$。

因 a、b 雨滴相遇过程时间极短，内力远大于重力，系统在竖直方向上动量守恒，有 $mv_m + 0 = 2mv_共$，得 $v_共 = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{4\pi\rho g}{3k}r}$。

取大雨滴继续下落 H 为过程，由动能定理有

$$2mgH - W = \frac{1}{2}(2m)v'^2_m - \frac{1}{2}(2m)v^2_共$$

解得 $W = \frac{4}{3}\rho g\pi r^3\left[2H - \frac{\rho\pi r}{3k}(4\sqrt[3]{2} - 1)\right]$。

9. 小环第 2 次运动到 b 点前一瞬间对轨道的压力与第 1 次之比 $\frac{N_2}{N_1} = \frac{2n^2+1}{3} + \frac{2h(n^2-1)}{3R}$。

解：小圆环第 1 次从 a 点下滑到 c 点，满足机械能守恒定律，则

$$mg(R+h) = \frac{1}{2}mv^2_{c1}$$

第 2 次从 a 点下滑到 c 点，满足机械能守恒定律，则

$$mg(R+h) + \frac{1}{2}mv^2_0 = \frac{1}{2}mv^2_{c2}$$

由于水平分速的大小与合速度的大小成正比，所以 $v_{c2} = nv_{c1}$，则

$$mg(R+h) + \frac{1}{2}mv^2_0 = n^2mg(R+h)$$

小圆环从 a 点下滑到 b 点，满足机械能守恒定律，故有

$$mgR + \frac{1}{2}mv^2_0 = \frac{1}{2}mv^2_b$$

在 b 点前一瞬间，有 $N - mg = m\frac{v^2_b}{R}$；

得 $N = (2n^2+1)mg + \frac{2mgh(n^2-1)}{R}$；

所以 $\frac{N_2}{N_1}=\frac{2n^2+1}{3}+\frac{2h(n^2-1)}{3R}$。

专题二　多过程的运动问题

1. AC
2. BD
3. 解：在物块 a、b 分离前，以物体 b 为研究对象，设物块 a、b 之间的弹力大小为 N，则根据牛顿第二定律可得

$$F+N-\frac{3}{5}mg\sin\theta=\frac{3}{5}ma \quad ⑬$$

把⑦和⑪式代入⑬式可得

$$N=\frac{2}{5}mg\sin\theta-\frac{4mg^2\sin^2\theta}{25x_0}t^2$$

4. 解：设 P 恰到 D 点的速度为 v_{D1}，由牛顿第二定律，有

$$m_1g=m_1\frac{v_{D1}^2}{\frac{5}{6}R}$$

得 $v_{D1}=\sqrt{\frac{5}{6}gR}$。

设弹簧压缩至 E 点时，弹性势能为 E_{p1}。取 P 从 E 点运动到 D 点为过程，由动能定理，有

$$E_{p1}-m_1g\left[(x+5R)\sin\theta+\frac{5}{6}R(1+\cos\theta)\right]-\mu m_1g(x+5R)\cos\theta=\frac{1}{2}m_1v_{D1}^2-0$$

得 $E_{p1}=\frac{403}{60}m_1gR=\frac{403}{180}mgR$。

设原弹簧和新弹簧的劲度系数分别为 k、k_1。

因 $E_P=\frac{1}{2}kx^2$，故 $\frac{k_1}{k}=\frac{E_{p1}}{E_p}=\frac{403}{432}$。

5. 解：(1) 由动能定理，求得 D 点速度 v_D。

$-2mgR=\frac{1}{2}mv_D^2-\frac{1}{2}mv_A^2$；

由牛顿第二定律得

$mg+F_N=m\frac{v_D^2}{R}$；

$\therefore F_N=\frac{3}{4}mg$。

根据牛顿第三定律可知，小球对轨道的压力为 $F_{压}=\frac{3}{4}mg$，方向竖直向上。

(2) 小球离开 C 点后在水平方向上做匀减速运动，由运动学公式

$x=v_C\cos\alpha t-\frac{1}{2}\frac{F_0}{m}t^2$；

则小球落点离 A 点的距离 L 为 $L=x+R\sin\alpha$；

解得 $L=\frac{9}{8}R$。

6. 解答：汽车刹车系统稳定后，汽车做匀减速运动，由动能定理可知克服阻力做的功为

$$W=\frac{1}{2}mv_2^2=7.84\times10^5\ \text{J}$$

设匀减速运动的时间为 t_3，则

$$t_3 = \frac{v_2}{a} = 3.5\ \mathrm{s}$$

平均功率的大小为

$$P = \frac{W}{t_3} = 2.24 \times 10^5\ \mathrm{W}$$

7. 解：A、B 两物体在下滑过程中，因摩擦力做功而产生的热量为 A 与 B 之间和 B 与 C 之间两部分摩擦力做功产生的热量之和。

当 $t > t_1$ 时，A 与 B 之间摩擦力为零，不做功。在 t_1 时间内，A 相对于 B 运动的距离为

$$s_1 = \frac{1}{2}a_1 t_1^2 - \frac{1}{2}a_2 t_1^2$$

A 与 B 之间摩擦力做功产生的热量为

$$Q_1 = f_1 s_1$$

解得

$$Q_1 = 1200\ \mathrm{J}$$

这个过程中，B 下滑的总距离

$$s_2 = \frac{1}{2}a_2 t_1^2 + \frac{1}{2}a_2' t_1^2$$

B 与 C 之间摩擦力做功产生的热量为

$$Q_2 = f_2 s_2$$

解得

$$Q_2 = 2400\ \mathrm{J}$$

设因摩擦力做功而产生的热量为 $Q_{总}$，有

$$Q_{总} = Q_1 + Q_2 = 3600\ \mathrm{J}$$

8. 解：滑块 B 与木板达到共同速度之前，木板由静止开始向右做加速度为 a_1 的匀加速直线运动，运动时间为 t_1。

$$f_2 - f_1 - f_3 = ma_1$$
$$s_1 = \frac{1}{2}a_1 t_1^2 = 0.2\ \mathrm{m}$$

滑块 B 与木板达到共同速度 v_1 后，对于 B 与木板组成的体系，做加速度为 a_2 的匀减速直线运动，运动时间为 t_2，由牛顿第二定律有

$$f_1 + f_3 = (m_B + m)a_2$$
$$s_2 = v_1 t_2 - \frac{1}{2}a_2 t_2^2 = 0.225\ \mathrm{m}$$

当滑块 A、B 及木板相遇时，三者达到共同速度 v_2 后，一起向右做加速度为 a_3 的匀减速直线运动，直至停止运动。

$$v_2 = v_1 - a_2 t_2 = 0.5\ \mathrm{m/s}$$
$$f_3 = \mu_2 (m_A + m_B + m)g = (m_A + m_B + m)a_3$$

$$s_3=\frac{v_2^2}{2a_3}=0.125\ \text{m}$$

从滑块 A、B 开始运动至木板停止运动的全过程中，木板的位移大小

$$s=s_1+s_2+s_3=0.55\ \text{m}$$

9. 解：若点 B 与点 A 恰好在同一位置，则粒子在两个阶段的位移大小相等，方向相反，即

$$s_1=-s_2 \qquad ⑱$$

代入题给条件，由以上①②③④⑤⑥⑦⑧式可得

$$E_2=\left(2-\frac{v_0}{gt_1}\right)E_1 \qquad ⑲$$

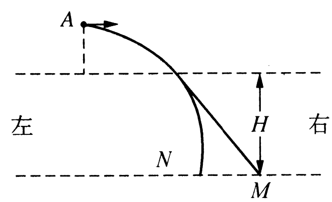
由⑲式可得，由油滴的运动可分为以下三种情况：

(1) 若 $t_1=\frac{v_0}{g}$，则 $E_2=E_1$，油滴前 t_1 时间内做匀速运动，后 t_1 时间先匀减速，再反向加速；

(2) 若 $t_1>\frac{v_0}{g}$，则 $E_2>E_1$，油滴前 t_1 时间内做匀加速运动，后 t_1 时间先匀减速，再反向加速；

(3) 若 $\frac{v_0}{2g}<t_1<\frac{v_0}{g}$，则 $E_2<E_1$，油滴前 t_1 时间内做匀减速运动，后 t_1 时间先匀减速，再反向加速。

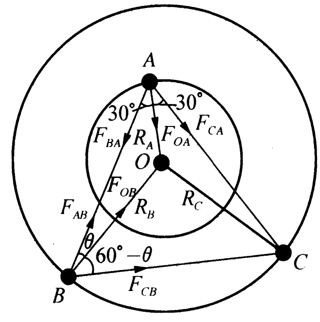
10. 解：(1)带电小球 M、N 从 A 点抛出后，做平抛运动；(2)M 进入电场后，做直线运动，N 进入电场后，水平方向做匀减速运动，离开电场时水平方向的速度减为零。运动轨迹如图所示。



题 10 图

专题三　万有引力与航天

1. AD
2. AC
3. B
4. 解：(1) 如图所示，在△AOB 中，由正弦定理有：



题 4 图

$$\frac{R_A}{\sin\theta}=\frac{R_B}{\sin 30°}$$

可得：

$$R_A=\frac{\sqrt{3}}{4}a$$

(2) 对 A 星体研究，A 星体分别受到 B、C 及 O 处星体对它的万有引力作用，方向分别指向 B、C 及 O，如图所示。

原题中已求得 B、C 星体对 A 星体的万有引力的合力：$F_A=2\sqrt{3}\,\frac{Gm^2}{a^2}$，方向指向 O；

由万有引力定律可得 O 处星体对 A 星体的万有引力：$F_{OA}=G\frac{2m\cdot M}{R_A^2}$，方向指向 O；

故 A 星体受到的合力为：

$F_{A合}=2\sqrt{3}\,\frac{Gm^2}{a^2}+\frac{2Gm\cdot M}{R_A^2}$，方向指向 O；

设三星体做圆周运动的周期为 T'，由牛顿第二定律可得

$$2\sqrt{3}\,\frac{Gm^2}{a^2}+\frac{2Gm\cdot M}{R_A^2}=2m\frac{4\pi^2}{T'^2}R_A$$

同理：对 B 星体研究，可得

$$\sqrt{7}\frac{Gm^2}{a^2}+\frac{Gm\cdot M}{R_B^2}=m\frac{4\pi^2}{T'^2}R_B$$

上两式相比可得

$$\frac{2\sqrt{3}\frac{m}{a^2}+\frac{2M}{R_A^2}}{\sqrt{7}\frac{m}{a^2}+\frac{M}{R_B^2}}=\frac{2R_A}{R_B}$$

将 R_A、R_B 代入上式，可得

$$\frac{1}{3\sqrt{3}}M=\frac{1}{7\sqrt{7}}M$$

要使上式成立，必须

$$M=0$$

综上分析，不可能在圆心 O 处还存在一个星体。

专题四　功和能

1. BC

2. A

3. AD

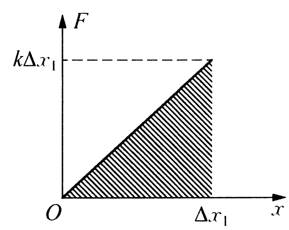
4. BC

5. A

6. 解：(1) 对篮球从静止释放到速度达到最大过程分析，由动能定理可列式

$$mg(h_1+\Delta x_1)-F_f(h_1+\Delta x_1)+W''_F=\frac{1}{2}mv_m^2-0$$

式中 W''_F 为该过程中弹簧弹力做的负功，由于弹力 $F=kx$，作出 $F-x$ 图象如图所示，由于 $F-x$ 图象下的"面积"代表力 F 所做的功，可得



题 6 图

$$W''_F=-\frac{1}{2}k\Delta x_1^2$$

代入得篮球在整个运动过程中的速度最大值

$$v_m=\sqrt{\frac{2(mg-F_f)(h_1+\Delta x_1)-k\Delta x_1^2}{m}}\approx 4.46\ \text{m/s}$$

(2) 对篮球从释放到第一次返回到释放高度过程研究，由动能定理可列式

$$-F_f(2h_1+2\Delta x_3)=0-E_{k0}$$

式中 Δx_3 为该过程弹簧的压缩量，E_{k0} 为篮球释放时或回到释放高度时获得的动能；对篮球从释放到第一次到达最低点过程研究，由动能定理可列式

$$mg(h_1+\Delta x_3)-F_f(h_1+\Delta x_3)+W'''_F=0-E_{k0}$$

式中 W'''_F 为该过程中弹簧弹力做的负功，由 $F-x$ 图象可得

$$W'''_F=-\frac{1}{2}k\Delta x_3^2$$

由以上三式可解得

$$\Delta x_3 \approx 0.167\ \text{m}$$

代入得

$$E_{k0} = 1.27\ \text{J}$$

由功能关系可得篮球释放时或回到释放高度时需对篮球做的功为 $W = E_{k0} = 1.27$ J。

7. 解：设发生弹性碰撞后 A、B 的速度大小分别为 v_A、v_B，取 v_0 方向为正，由动量守恒定律，有

$$m_A v_0 = -m_A v_A + m v_B$$

由机械能守恒定律，有

$$\frac{1}{2}m_A v_0^2 = \frac{1}{2}m_A v_A^2 + \frac{1}{2}m v_B^2$$

由题意，碰后 A 过 Q 点时的向心力由重力提供，设此时 A 的速度为 v_{A1}，根据牛顿第二定律，有

$$m_A g = m_A \frac{v_{A1}^2}{R}$$

A 从碰后到滑回到最高点 Q 的过程中机械能守恒，有

$$\frac{1}{2}m_A v_A^2 = \frac{1}{2}m_A v_{A1}^2 + 2m_A gR$$

联立上述各式，解得 $v_B = 1\ \text{m/s}$，$m_A = \frac{1}{11}$ kg。

设碰后 B 向右滑过粗糙段的距离为 NL 时停止运动，由动能定理，有

$$-\mu mg \cdot NL = 0 - \frac{1}{2}m v_B^2$$

解得 $N = 5$。

在粗糙段上，B 做匀减速直线运动，设加速度为 a，有

$$\mu mg = ma$$

运动时间 $t_1 = \frac{v_B}{a} = 1$ s。

在光滑段上，B 做匀速直线运动，设碰后 B 滑至第 n 个光滑段时的速度为 v_n，由动能定理

$$-\mu mg \cdot nL = \frac{1}{2}m v_n^2 - \frac{1}{2}m v_B^2$$

得 $v_n = \sqrt{v_B^2 - 2\mu gnL} = \sqrt{1-0.2n}$ m/s（n 取 1、2、3、4）；

运动时间 $t_2 = \frac{L}{v_1} + \frac{L}{v_2} + \frac{L}{v_3} + \frac{L}{v_4} = \frac{\sqrt{5}}{10}\left(\frac{3}{2} + \frac{\sqrt{3}}{3} + \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$ s；

B 在轨道上运动的总时间 $t = t_1 + t_2 = \frac{\sqrt{5}}{10}\left(\frac{3}{2} + \frac{\sqrt{3}}{3} + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) + 1\ \text{s} \approx 1.62$ s。

专题五　碰撞和动量

1. C

2. A

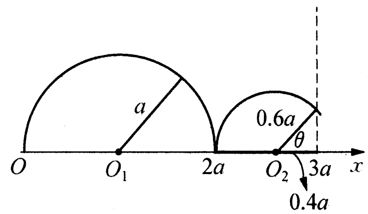
3. 解：当保持磁感应强度 B_1 不变时，打在板上的离子对应的速度范围为

$$\frac{4}{3}v_0 \leqslant v \leqslant 2v_0$$

其中速度最小 $\left(v=\frac{4}{3}v_0\right)$ 的离子对应的半径 $R=a$，该离子经板弹回后继续在磁场中做圆周运动的时间最长，弹回后该离子的半径为

$$R'=0.6a$$

该离子的运动轨迹如图所示。



题 3 图

该离子从进入磁场到打到板上所经历的时间为

$$t_1=\frac{\pi m}{qB_1}=\frac{3\pi m}{4qB_0}$$

离子被板弹回后在磁场运动的时间为

$$t_2=\frac{\pi-\theta}{2\pi}\cdot\frac{2\pi m}{qB_1}=\frac{3(\pi-\theta)m}{4qB_0}$$

由图可知

$$\cos\theta=\frac{0.4a}{0.6a}=\frac{2}{3}$$

可得离子在磁场中运动的最长时间为

$$t=t_1+t_2=\frac{3m(2\pi-\theta)}{4qB_0}=\frac{3m}{4qB_0}\left(2\pi-\cos^{-1}\frac{2}{3}\right)$$

4. 解：以水平地面上的左端点为原点，水平向右为正方向建立 x 轴，物体 B 受到的水平方向合力满足 $F_x=-\mu m_B g=-\frac{\mu_0 m_B g}{x_0}x$，$k=\frac{\mu_0 m_B g}{x_0}$；

故物体 B 向右做简谐运动，且斜面底端为平衡位置。

所以，物体 B 的运动时间为简谐运动的四分之一周期，即 $t=\frac{1}{4}\times2\pi\sqrt{\frac{m_B}{k}}=\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{x_0}{\mu_0 g}}$。

5. 解：设 A、B 发生完全非弹性碰撞后的共同速度为 v_{AB}，以向左为正，由动量守恒定律有

$$m_A v'_A=(m_A+m_B)v_{AB} \quad ⑱$$

A、B 因碰撞而损失的机械能为

$$\Delta E=\frac{1}{2}m_A v'^2_A-\frac{1}{2}(m_A+m_B)v^2_{AB} \quad ⑲$$

由⑪⑱⑲代入题给数据可得 $\Delta E=2.8\ \text{J}$。

故系统因摩擦而产生的总热量 $Q=E_k-\Delta E=7.2\ \text{J}$。

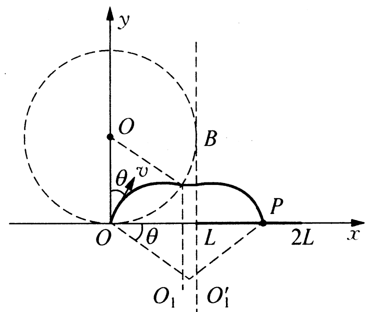
第二部分　电学综合

专题六　电路分析

1. C
2. D
3. BCD
4. BC

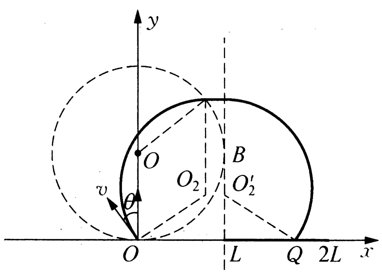
专题七　电场与磁场

1. AC
2. A
3. D
4. BC
5. BD
6. B
7. AD
8. C
9. 解：先考察如图 a 所示的离子，作出其运动轨迹圆的圆心 O_1 和对应的轨迹，由于磁感应强度为 B_0 时，离子运动轨迹圆与磁场范围圆半径相同，都为 L，因此圆心 O 和 O_1 及两圆公共弦的交点构成一菱形，离子离开圆形磁场时速度平行于 x 轴。进入直线边界匀强磁场后，根据对称性，作其圆心 O_1' 和轨迹，易解得离子最后打在 P 点坐标为 $(L + L\cos\theta,\ 0)$。

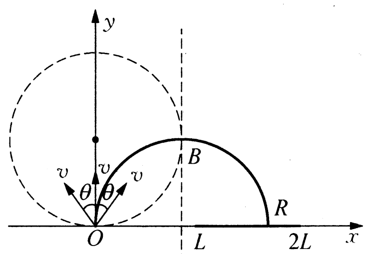


题 9 图 a

再考察如图 b 所示的离子，以相同方法进行分析，作出其运动轨迹，解得离子最后打在 Q 点坐标也为 $(L + L\cos\theta,\ 0)$。



题 9 图 b



题 9 图 c

最后考察沿 y 轴入射的离子，如图 c 所示，先经过四分之一圆周到达圆形磁场和直线边界磁场的切点，再经过四分之一圆周到达 x 轴，R 点坐标为 $(2L,\ 0)$。

即需要收集所有离子所需收集板长度 $\Delta L = 2L - (L + L\cos\theta) = L(1 - \cos\theta)$。

10. 解：(1) 离子绕新的闭合平衡轨道旋转的周期 T' 等于离子在峰区和谷区运动的总时间。

离子在峰区运动的总时间

$$t_1' = \frac{3\theta}{2\pi} \cdot \frac{2\pi m}{qB} = \frac{3\pi m}{2qB}$$

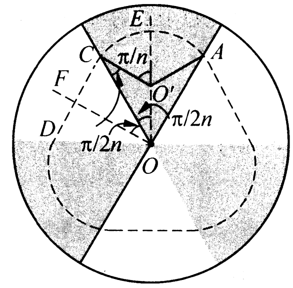
离子在谷区运动的总时间

$$t_2' = \frac{3\theta'}{2\pi} \cdot \frac{2\pi m}{qB'} = \frac{\pi m}{2qB'} = \frac{(\sqrt{3} + 1)\pi m}{2qB}$$

可得周期

$$T' = t_1' + t_2' = \frac{(4 + \sqrt{3})\pi m}{2qB}$$

(2) 若原题中的圆形区域等分成 $2n$ 个扇形区域，离子的运动轨迹如图所示(图中只画出 $n=3$ 的情形作为示意)，离子在峰区做圆周运动，在谷区做匀速直线运动，峰区与谷区的圆心角均为 $\frac{2\pi}{2n}=\frac{\pi}{n}$，图中虚线 OE 和 OF 分别为峰区和谷区的平分线，由几何关系可知 $OF \parallel O'C$，图中标出了各角度值，可知离子在峰区的圆弧所对的圆心角 $\theta=\frac{2\pi}{n}$，可得离子在峰区运动的总时间



题 10 图

$$T_1=\frac{n\theta}{2\pi}\cdot\frac{2\pi m}{qB}=\frac{2\pi m}{qB}$$

可见离子在峰区运动的总时间与 n 无关。

离子在谷区做匀速直线运动，经历的总时间

$$T_2=\frac{n\overline{CD}}{v}$$

由等腰$\triangle COO'$的几何关系可得底边

$$\overline{CO}=2r\cos\frac{\pi}{2n}$$

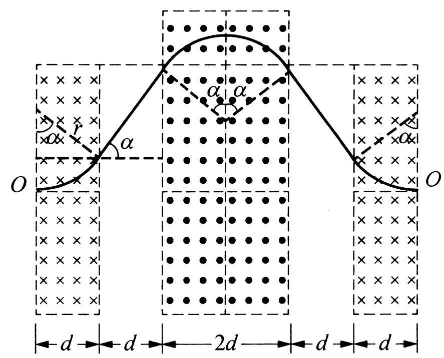
可得

$$\overline{CD}=2\,\overline{CO}\sin\frac{\pi}{2n}=2\times 2r\cos\frac{\pi}{2n}\cdot\sin\frac{\pi}{2n}=2r\sin\frac{\pi}{n}$$

$$T_2=\frac{2nr\sin\frac{\pi}{n}}{v}=\frac{2m}{qB}\cdot n\sin\frac{\pi}{n}$$

可见离子在谷区运动的总时间与 n 有关，其关系式为 $T_2=\frac{2m}{qB}\cdot n\sin\frac{\pi}{n}$。

11. 解：当磁场高度没有上限时，把中间两个区域的磁场沿 OO' 平移到中间对接不留缝隙时粒子从 O 运动到 O' 增加的路程最大，粒子运动轨迹如图所示。粒子从 O 运动到 O' 增加路程的最大值 $\Delta s'_m=s'_m-2d=\frac{2d}{\cos\alpha}-2d=\frac{4d}{3}$，增加时间的最大值 $\Delta t'_m=\frac{\Delta s'_m}{v}=\frac{4d}{15v_0}$。



题 11 图

12. 解：若是在 $t=\frac{T_0}{2}$ 时刻发射粒子，由分析可知粒子每次进出电场时粒子均被加速，粒子的运动轨迹如图所示。粒子最终被探测到的位置 y 满足

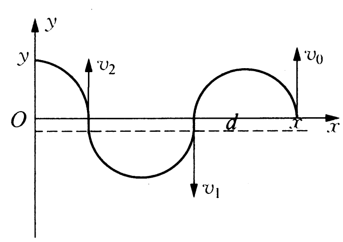
$$y=\frac{mv_2}{qB}\text{，即 } v_2=\frac{qBy}{m}$$

对粒子经电场第二次、第一次加速过程研究，由动能定理可列式

$$qU_0=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2,\ qU_0=\frac{1}{2}mv_1^2-\frac{1}{2}mv_0^2$$

可得粒子经电场第一次加速后的速度和粒子的初速度分别为

$$v_1=\sqrt{v_2^2-\frac{2qU_0}{m}}=\sqrt{\left(\frac{qBy}{m}\right)^2-\frac{2qU_0}{m}},\ v_0=\sqrt{\left(\frac{qBy}{m}\right)^2-\frac{4qU_0}{m}}$$



题 12 图

因此粒子发射源的位置

$$x=y+2R_1+2R_0=y+\frac{2}{qB}\left(\sqrt{(qBy)^2-2mqU_0}+\sqrt{(qBy)^2-4mqU_0}\right)。$$

13. 解：N 点与质量为 $0.5m$ 的离子到达探测板上的位置区间为

$$2\frac{mv_0}{q(B+0.2B)}+0.5r_0\sim2\frac{mv_0}{q(B-0.2B)}+0.5r_0$$

将 $r_0=\frac{mv_0}{qB}$ 代入上式，得 $\frac{13mv_0}{6qB}\sim\frac{3mv_0}{qB}$。

N 点与质量为 m 的离子到达探测板上的位置区间为

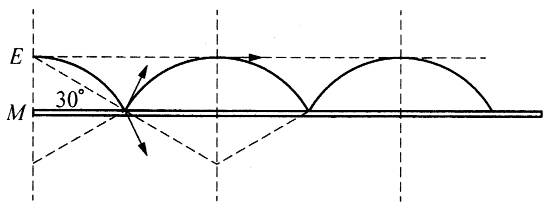
$$2\frac{mv_0}{q(B+0.2B)}\sim2\frac{mv_0}{q(B-0.2B)}$$

解得 $\frac{5mv_0}{3qB}\sim\frac{5mv_0}{2qB}$。

对照两个区间，重合的长度为 $\Delta l=\frac{5mv_0}{2qB}-\frac{13mv_0}{6qB}=\frac{mv_0}{3qB}$。

14. 解：如图所示，由粒子在磁场中的运动轨迹可知，粒子从 E 点水平射入磁场，经 60°的圆心角所对的圆弧，以与水平方向成 60°角的斜向下的方向与薄板发生碰撞，然后每经 120°的圆心角所对的圆弧就会再次撞向薄板。若要使粒子垂直射出右边界，即粒子要恰好从每个圆弧的最高点水平射出。

根据几何关系可知 $L=2nd\cos30°$，$(n=1, 2, 3\cdots)$ ⑬



题 14 图

解得 $n=\frac{\sqrt{3}L}{3d}$ ⑭

粒子的运动周期 $T=\frac{2\pi m}{qB}$

运动时间 t 与圆心角 θ 成正比，即 $t=\frac{\theta}{2\pi}T$ ⑮

由图可知，设粒子最后一次碰撞到射出磁场的时间为 $t'=\frac{1}{6}T$，

粒子在磁场中的运动时间 $t=2nt'=2\frac{\sqrt{3}L}{3d}\cdot\frac{T}{6}=\frac{\sqrt{3}L}{9d}\cdot\frac{2\pi m}{qB}$。 ⑯

15. 解：对于质量为 m_0 的离子，经电压为 U 的加速电场之后，其速度大小为 v，由原题解③式可得

$$v=\sqrt{\frac{2qU}{m_0}}$$ ⑪

离子在加速电场中做匀加速度直线运动，根据牛顿第二定律和运动学知识可得

$$q\frac{U}{D}=m_0a$$ ⑫

$$v = at_1$$ ⑬

由以上三式可得

$$t_1 = \sqrt{\frac{2m_0}{qU}}D$$ ⑭

当离子进入磁场后，做匀速圆周运动，其轨迹为一个半圆，则其运动时间为半个周期，即在磁场中的运动时间为

$$t_2 = \frac{1}{2}\frac{2\pi m_0}{qB} = \frac{\pi m_0}{qB}$$ ⑮

则离子从出发到底片所需的时间为

$$t = \sqrt{\frac{2m_0}{qU}}D + \frac{\pi m_0}{qB}$$ ⑯

则根据题设的条件可得离子到达底片所需的最短时间和最长时间分别为：

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{2m}{q(U_0+\Delta U)}}D + \frac{\pi m}{qB},\ t_{\max} = 2\sqrt{\frac{m}{q(U_0-\Delta U)}}D + \frac{2\pi m}{qB}$$

16. 解：如图所示，从 N 点出射粒子的速度为 $v_0 = \frac{2El'}{Bl}$ ①

由题意，在 B' 磁场中运动半径 $r = \frac{a}{2}$ ②

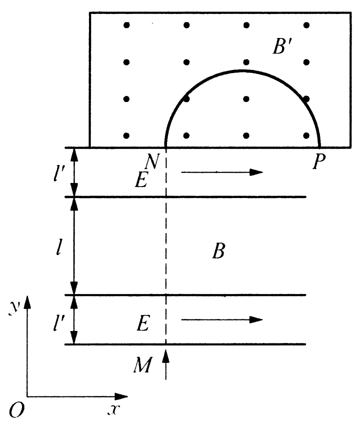
根据向心力公式有 $qv_0B' = m\frac{v_0^2}{r}$ ③

联立①②③得 $m = \frac{qalBB'}{4El'}$ ④

粒子被底片吸收过程，由动量定理得

$F\Delta t = \frac{I\Delta t}{q}mv_0$ ⑤

联立①③④⑤式解得 $F = \frac{IaB'}{2}$。



题 16 图

17. 解：由题意得，$v_3 = \sqrt{2}v_1$，运动时间还是由 $h = \frac{1}{2}a_1t_1^2$ 确定

$$s_3 = \sqrt{2}s_1 = \frac{2\sqrt{6}}{3}h$$

$_1^1\mathrm{H}$ 进入磁场时速度的方向与 x 轴正方向夹角为 θ_3。$_1^1\mathrm{H}$ 进入磁场时速度的 y 分量的大小为 $a_1t_1 = v_3\tan\theta_3$。

在磁场中运动的速度

$$v_3' = \sqrt{v_3^2 + (a_1t_1)^2}$$

设磁感应强度大小为 B，$_1^1\mathrm{H}$ 在磁场中运动的圆轨道半径为 R_3，由洛伦兹力公式和牛顿第二定律有

$$qv_3'B = \frac{mv_3'}{R_3}$$

回到 x 轴时，有

$$\Delta x = 2R_3\sin\theta_3 = \frac{2mv_3'\sin\theta_3}{qB}$$

因为

$$s_1 = 2R_1 \sin\theta_1 = \frac{2mv'_1 \sin\theta_1}{qB}$$

且

$$v'_1 \sin\theta_1 = v'_3 \sin\theta_3 = a_1 t_1$$

得

$$\Delta x = s_1$$

所以${}_1^1$H第一次离开磁场的位置到原点O的距离为

$$s_3 - \Delta x = (\sqrt{2}-1)s_1 = \frac{2(\sqrt{6}-\sqrt{3})}{3}h$$

18. 解：(1) 设$t=1$ s内地面上垂直阳光的1 m^2面积上接收的可见光光子数为n，则有

$$45\%Pt = n \cdot h\frac{c}{\lambda}$$

解得 $n = \frac{45\%Pt\lambda}{hc} = \frac{0.45\times 1.4\times 10^3\times 1\times 0.55\times 10^{-6}}{6.6\times 10^{-34}\times 3\times 10^8}$ 个 $= 1.75\times 10^{21}$ 个。

设想一个以太阳为球心、日地间距离为半径的大球面包围着太阳。大球面接收的光子数即等于太阳辐射的全部光子数，则太阳每秒辐射出的可见光光子数为

$$\begin{aligned} N &= n\cdot 4\pi R^2 = 1.75\times 10^{21}\times 4\times 3.14\times (1.5\times 10^{11})^2 \text{ 个} \\ &= 4.9\times 10^{44} \text{ 个} \end{aligned}$$

(2) 地球只有向阳的半个球面才接受太阳光的辐射，且与阳光垂直的有效面积是以地球半径为半径的圆平面的面积，故地球接受太阳光的总功率为

$$\begin{aligned} P_{地} &= P\cdot \pi r^2 = 1.4\times 10^3\times 3.14\times (6.4\times 10^6)^2 \text{ W} \\ &= 1.8\times 10^{17} \text{ W} \end{aligned}$$

专题八　电磁感应与交变电流

1. BC
2. AC
3. D
4. BC
5. B

专题九　带电粒子在复合场中的运动

1. 解：设区域Ⅱ的场强为E_2，方向竖直向下，小球在区域Ⅱ的加速度为a，则根据牛顿第二定律，有

$$qE_2 + mg = ma \qquad ㉑$$

小球从C平抛到斜面底端，则根据类平抛运动规律可得

$$3l = \frac{1}{2}at^2,\ 2l = v_0 t \qquad ㉒$$

由㉑㉒式可得 $E_2 = \frac{mg}{2q}$。 ㉓

现讨论小球进入圆环运动的情况，当小球在区域Ⅱ内运动时，受到电场力、重力和轨道弹力作用；小球在

区域Ⅰ内运动时，重力与电场力平衡，小球所受到的洛伦兹力和圆环轨道的弹力不做功，因此小球在区域Ⅰ的圆环轨道中做匀速圆周运动。设小球第一次回到 C 点时速度为 v_1，根据动能定理可得

$$qE_2H + mgH = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \quad ㉔$$

代入数据可得

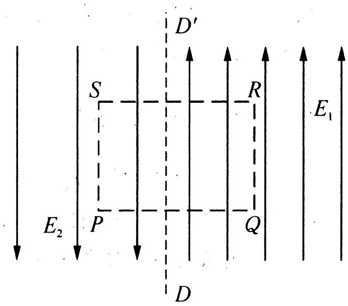
$$v_1^2 = \sqrt{v_0^2 + \frac{9}{2}gl} = \sqrt{\frac{11}{2}gl} \quad ㉕$$

同理可得

$$v_2^2 = \sqrt{v_1^2 + \frac{9}{2}gl} = \sqrt{10gl} \quad ㉖$$

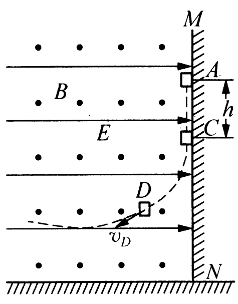
$$v_n^2 = \sqrt{v_{n-1}^2 + \frac{9}{2}gl} = \sqrt{\frac{9n+2}{2}gl} \quad ㉗$$

这里我们可以发现，小球每经过一次圆环轨道，其动能都会增加，这是违反能量守恒定律的。那么问题出在哪里呢？问题出在题中所给的电场，根据题意在 DD' 两侧存在两个场强不同的匀强电场，这种电场是不存在的。如图所示，在这样的电场中带电粒子沿闭合回路运动一周，电场力所做的功不为零，即从 P 出发回到 P 点“电势”发生了变化，也就不存在“电势”。在这种电场中，电场力做功就与路径有关，显然是与静电场的性质是矛盾的。因此，命题者“虚构”了一个不存在的电场，有科学性问题。

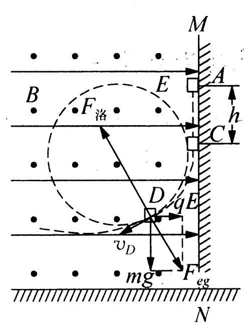


题 1 图

2. 解：(1) 根据题意，D 点处小滑块的速度最大，此后运动过程中重力、电场力的合力 F_{eg} 对小滑块做负功，速度方向与合力 F_{eg} 的方向成钝角，轨迹如图(a)所示。



题 2 图(a)



题 2 图(b)

(2) 在 D 点处，受力情况如图(b)所示，做曲线运动的物体轨迹向合外力方向弯曲，可知 $F_洛 > F_{eg}$；

(3) 由合外力指向圆心方向的分力提供向心力可得

$$qv_DB - \sqrt{(mg)^2 + (qE)^2} = \frac{mv_D^2}{R}$$

解得 $R = \dfrac{mv_D^2}{qv_DB - \sqrt{(mg)^2 + (qE)^2}}$。

3. 解：(1) 等离子体射入磁场，带正电的离子受到向下的洛伦兹力作用偏向 B 板，带负电的离子受到向上的洛伦兹力作用偏向 A 板，故 B 板是电源的正极，A 板是电源的负极。

(2) 电源电动势应为开路时两板间的电压，稳定时两板上积累的电荷不再增加，此时电荷所受的洛伦兹力与电场力平衡，有 $e\dfrac{U}{d}=evB$，得电源的电动势 $E=U=Bdv$。

(3) 磁流体发电机的最大功率 $P_m=EI_m$，电路中的最大电流 $I_m=\dfrac{q}{t}=ne$，得到 $P_m=neBdv$。

4. a) 解：当杆从初始位置转到 A 位于 O 正上方时速度刚好为零的过程中，A、B 以及杆所组成的系统能量守恒

$$-3qEl\cos\theta-mgl\sin\theta=mgl$$

解得 $mgl(1+\sin\theta)+3qEl\cos\theta=0$ 即 $1+\sin\theta+\sqrt{3}\cos\theta=1+2\sin(\theta+60^\circ)=0$；

由数学知识可知(题干中要求 $90^\circ\leqslant\theta\leqslant180^\circ$)：

当 $\theta=150^\circ$ 时系统动能为零即角速度为零；

当 $\theta<150^\circ$ 时系统动能小于零即 A 球无法到达 O 点正上方；

当 $\theta>150^\circ$ 时系统动能大于零即角速度 $\omega=\sqrt{g\cdot\dfrac{-2\sqrt{3}(1+\sin\theta)-6\cos\theta}{5\sqrt{3}l}}$。

综上，当 $\theta\geqslant150^\circ$ 时 A 球能位于 O 点正上方。

b) 解：当 $\theta=150^\circ$ 时，杆恰好能从初始位置转到 A 位于 O 点正上方，所以杆在摆动过程中的最大角速度是第一次从初始位置摆到 A 位于 O 点正下方，由 A、B 以及杆所组成的系统能量守恒，

$$-3qEl\cos\theta-mgl\sin\theta=\frac{5}{2}m\omega^2l^2-mgl$$

解得 $\omega=\sqrt{g\cdot\dfrac{2\sqrt{3}(1-\sin\theta)-6\cos\theta}{5\sqrt{3}l}}=\sqrt{\dfrac{4g}{5l}}$。

专题十　电磁感应与力学综合

1. 解：(1)先分析临界情况，若金属棒进入 MN 右侧磁场后，整个回路的磁通量恰好保持不变，则整个回路的磁通量变化率为零，回路中无电流，金属棒以速度 v_0 做匀速运动。则经时间 t 后，回路的总磁通量为

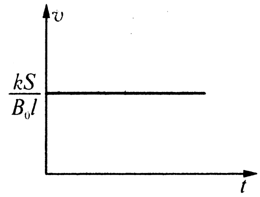
$$\Phi_t=kSt-B_0lv_0(t-t_0)$$

须满足条件 $\Delta\Phi=kSt-B_0lv_0t=0$，即 $v_0=\dfrac{kS}{B_0l}$。

(2) 若 $v_0>\dfrac{kS}{B_0l}$，则金属棒进入磁场后，回路的总磁通量减少。根据楞次定律，回路中将产生顺时针方向的感应电流，根据左手定则可以判断，金属棒将受到向左的安培力作用。在安培力的作用下，金属棒将做减速运动，当减速到 $v=\dfrac{kS}{B_0l}$ 开始做匀速运动。

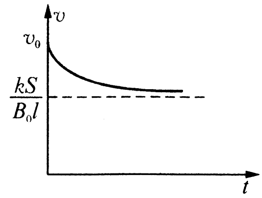
(3) 若 $v_0<\dfrac{kS}{B_0l}$，则金属棒进入磁场后，回路的总磁通量增加。根据楞次定律，回路中将产生逆时针方向的感应电流，根据左手定则可以判断，金属棒将受到向右的安培力作用。在安培力的作用下，金属棒将做加速运动，当加速到 $v=\dfrac{kS}{B_0l}$ 开始做匀速运动。

金属棒运动的图象如第 1 题答图(a)、(b)、(c)所示。



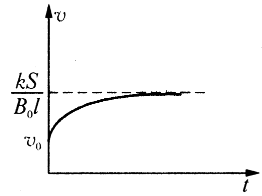
$v_0=\frac{kS}{B_0 l}$

题 1 图(a)



$v_0>\frac{kS}{B_0 l}$

题 1 图(b)



$v_0<\frac{kS}{B_0 l}$

题 1 图(c)

2. 解：设导体棒从原点运动到某个位置时轨道间的棒长为 l，速度为 v，时间为 t，此时回路中的电流为 $I=\frac{E}{R}=\frac{Blv}{\rho l}=\frac{Bat}{\rho}$。

可见电流 I 与时间 t 成正比，故通过导体棒某截面的电量为

$$q=\bar{I}\cdot t=\frac{Bat^2}{2\rho}=\frac{By}{\rho}$$

将 $y=L$ 代入，得 $q=\frac{BL}{\rho}$。

3. (1) 上升过程：

解法一：导体棒通过磁场区域的过程中，通过电阻 R 的电量

$$q=\bar{I}t=\frac{Bl\bar{v}}{R}t=\frac{Bl\Delta x}{R}=\frac{\sqrt{30}}{5}\times 0.6\ \text{C}=0.66\ \text{C}$$

解法二：对导体棒通过磁场区域的过程运用动量定理，有

$$I_{合}=(F-mg\sin\theta-\mu mg\cos\theta)t-B\bar{I}lt=m\Delta v$$

其中 $\Delta v=k\Delta x=5\times 0.6\ \text{m/s}=3\ \text{m/s}$；

代入数据解得 $q=\bar{I}t=0.12\times\sqrt{30}\ \text{C}=0.66\ \text{C}$。

(2) 下降过程，有 $q=It=\frac{Blv'}{R}t=\frac{\frac{\sqrt{30}}{5}\times 0.1\times 2}{0.1}\times 0.3\ \text{C}=0.66\ \text{C}$。

可见虽然上升和下降过程导体棒的运动情况不同，但通过 R 的电量相同。

4. 解：设 PQ 棒从静止到 v 所用的时间为 t，则在此过程中对 PQ 棒由动量定理得 $F\cdot t-F_{安}\cdot t=mv-0$，其中安培力的冲量 $F_{安}\cdot t=B\cdot\bar{I}\cdot t\cdot l=Bql$，故

$$t=\frac{Bql+mv}{F}=\frac{3R(Bql+mv)}{Blk}$$

5. 解：导体棒 ab 切割磁感线，产生感应电动势，电容器 C 将被充电，ab 棒中有充电电流流过，ab 棒受到安培力的作用而做减速运动，当 ab 棒以稳定速度 v 匀速运动时，有

$$BLv=U_C=\frac{Q_C}{C}$$

对棒 ab，取 v_0 方向为正方向，由动量定理，有

$$-B\bar{I}L\cdot t=mv-mv_0$$

且 $\bar{I}t=Q_C$；

联立以上各式，解得 $Q_C = \dfrac{CBLmv_0}{m + B^2L^2C}$。

6. 解：因为“炮弹”所受的安培力为变力，不能直接根据功的定义式求出，但“炮弹”在加速过程中所受的合外力就是安培力，因此根据动能定理：

$$W = \frac{1}{2}mv_m^2 - 0$$

由题解⑤⑥⑦⑧⑨⑩式可得

$$W = \frac{1}{2}m\left(\frac{BlCE}{B^2l^2C + m}\right)^2$$

7. 解：设杆上滑时间为 t_1，上滑的最大距离为 x；下滑时间为 t_2，下滑到出发位置时的速度大小为 v。
上滑时，取 v_0 方向为正方向，由动量定理，有

$$-B\bar{I}_1L \cdot t_1 - mg\sin\theta \cdot t_1 = 0 - mv_0 \quad ①$$

下滑时，取 v 方向为正方向，有

$$mg\sin\theta \cdot t_2 - B\bar{I}_2L \cdot t_2 = mv - 0 \quad ②$$

上滑过程中，电路中的平均感应电动势 $E_1 = \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \dfrac{BLx}{t_1}$；

通过电路的电荷量 $q = \bar{I}_1t_1 = \dfrac{E_1}{R}t_1 = \dfrac{BLx}{R}$。 ③

同理，下滑过程中的电荷量 $q = \bar{I}_2t_2 = \dfrac{BLx}{R}$。 ④

由式①②③④式得

$$v = gt\sin\theta - v_0$$

8. 解：回路进磁场时，在 Δt 时间内 cd 受安培力冲量 $I_{冲} = -I'Bl\Delta t = -Bql$ ①
同理可知，回路出磁场时，ab 受安培力冲量仍为上述值，设回路进出一块有界磁场区域安培力冲量为 I_0，有 $I_0 = 2I_{冲}$ ②
则列车进出一块有界磁场过程中，根据动量定理有 $I_0 = mv_t - mv$ ③
由功能关系可知，回路中所产生的焦耳热 $Q = \dfrac{1}{2}mv^2 - \dfrac{1}{2}mv_t^2$ ④
联立①②③④式得 $Q = \dfrac{1}{2}m\left[v^2 - \left(v - \dfrac{B^2l^3}{mR}\right)^2\right]$ ⑤

9. 解：(1) 线框在进入磁场过程中的机械能为

$$E = mgy + \frac{1}{2}m(v_0^2 + v_y^2)$$

只有线框的动能保持不变，才能满足机械能与线框中心位置的 y 坐标成线性关系，故线框是匀速进入磁场区域的，与原题的情景相同。线框完全进入磁场区域时，其中心坐标 $x_2 = \Delta x_1 + l = 0.50\ \text{m}$，$y_2 = 0.45 - v_{y1} \cdot \dfrac{l}{v_0} = 0.35\ \text{m}$，线框进入磁场区域后水平方向做匀速运动，经时间 $t_3 = \dfrac{0.60 - 0.50}{v_0} = 0.05\ \text{s}$，线框沿竖直方向下降

$$\Delta y_3 = v_{y1}t_3 + \frac{1}{2}gt_3^2 = 0.1125\ \text{m}，即\ y_3 = (0.35 - 0.1125)\text{m} = 0.2375\ \text{m}$$

故当线框中心位置的 x 坐标为 0.60 m 时，其中心位置的 y 坐标为 0.2375 m。
(2) 在线框离开、又进入、又离开……磁场区域的过程中，由水平方向动量定理可列式

$$-qBl = m(v_x - v_0)，其中：q = \frac{\Delta\phi}{R} = \frac{Bl\Delta x}{R}$$

可得

$$v_x = v_0 - \frac{B^2 l^2 \Delta x}{mR}$$

当线框中心从 x=0.60 m 到 0.65 m 过程，上式中的 Δx=0.05 m，线框沿水平方向做减速运动，之后从 x=0.65 m 起，线框向右运动中磁通量均保持不变，无感应电流产生，线框沿水平方向速度保持不变，故当 x=0.85 m 时，线框的水平速度：

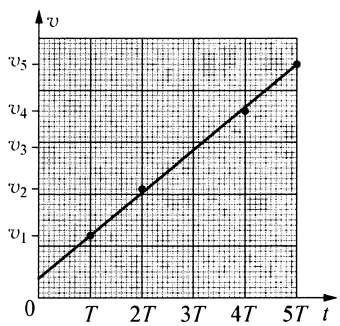
$$v_x = v_0 - \frac{B^2 l^2 \Delta x}{mR} = (2 - 5 \times 0.05)\text{m/s} = 1.75\ \text{m/s}$$

(3) 根据第(2)问的分析可知线框沿水平方向的速度不能减到零，线框水平速度的最终值为 v_x = 1.75 m/s。

专题十一　力学实验

1. (1) A　C

(2) 如图所示：



题 1 图

(3) 小车的速度随时间均匀变化　加速度

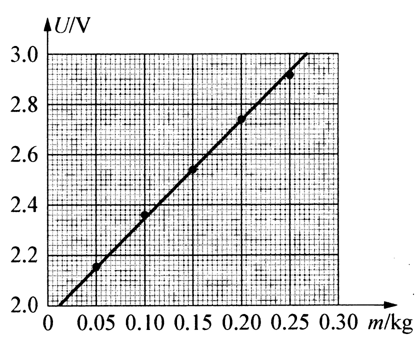
(4) 越小越好　有关

(5) 如果小球的初速度为 0，其速度 $v \propto t$，那么它通过的位移 $x \propto t^2$。因此，只要测量小球通过不同位移所用的时间，就可以检验小球的速度是否随时间均匀变化。

2. (1) ① 81.7　② 0.0122　(2) 略

(3) ③ $\frac{1.75\times10^3}{n}$$\left(在\frac{1.67\times10^3}{n}\sim\frac{1.83\times10^3}{n}之间均正确\right)$　④ $\frac{3.47}{l_0}$$\left(在\frac{3.31}{l_0}\sim\frac{3.62}{l_0}之间均均正确\right)$

3. (1) 2.75　(2) 如图所示



题 3 图

(3) $\mu(M+m)g$　μg　(4) 0.40

4. (1) 非线性　(2) 存在摩擦力　(3) 调节轨道的倾斜度以平衡摩擦力　远小于小车的质量

5. (1) B　(2) 乙　(3) 0.31(0.30～0.33 都算对)　(4) 远大于

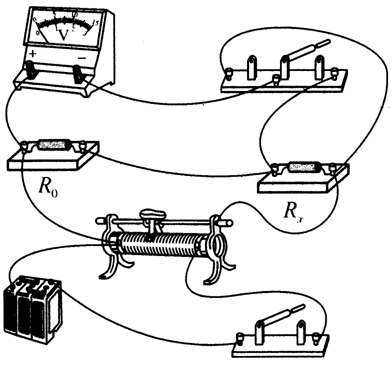
6. (1) ① A　② AB　③ $-mgh_B$，$\frac{1}{2}m\left(\frac{h_C-h_A}{2T}\right)^2$　④ C　⑤ 该同学的判断依据不正确

(2) ① AB　② BC

7. 答案　(1) B　(2) ACD　(3) $x_4-x_3=x_3-x_2=x_2-x_1=x_1$，D

专题十二　电学实验

1. (1) 如图所示：



题 1 图

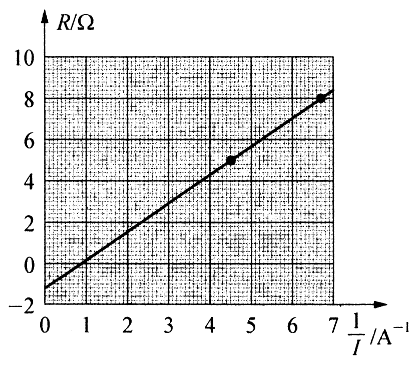
(4) $\left(\frac{U_2}{U_1}-1\right)R_0$

(6) 48.2

2. (1) 5.00　变小　增大　B　(2) 2.8

3. (1) ① 开关未断开　② 电阻箱阻值为零

(2) 图象如图所示：



题 3 图

1.4(1.30～1.44 都算对)　1.2(1.0～1.4 都算对)

(3) 1.4(结果与(2)问第一个空格一致)　1.0(结果比(2)问第二个空格小 0.2)

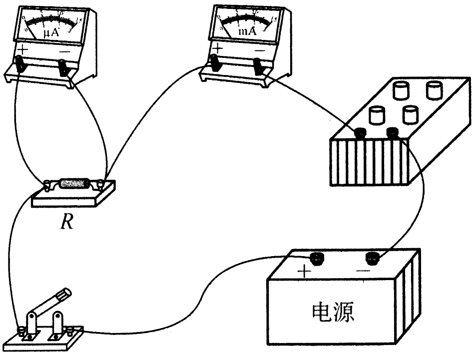
4. (1) 黑　(2) B　(3) 160　880　(4) 1.47 mA(或 1.48 mA)　1100 Ω　2.95 V

5. (1) E_2　R_2　(2) C　(3) 不偏转　偏转　(4) ⑤④②③①

专题十三　设计实验

1. (1) 从右向左　(2) 0.19　0.038

2. 答案:(1)



(2) C　(3) AC　(4) $\frac{99}{79}$

题 2 图

专题十四　选考模块

1. CDE

2. (1) $p_{10}=\frac{1}{2}(p_0+p)$　(2) $V_1=\frac{4(p_0+p)V_0}{2p_0+p}$; $p_1=\frac{1}{4}(2p_0+p)$

3. (1) 7 m　(2) $(6\sqrt{2}-3)\text{m}\approx 5.5\text{ m}$

4. A

5. C

6. (1) B　(2) $\frac{\Delta x\cdot d}{(n-1)l}$　(3) 630

提供各种书籍的 PDF 电子版代找服务，如果您找不到您想要的书的 PDF 电子版，我们可以帮您找到，如有需要，请联系微信、QQ。

PDF 代找说明：

本公司可以帮助您找到您想要的 PDF 电子书。质量都很清晰，只要您提供给我们相关信息，一般都能找到，如果您有需求，请联系我们。

现已经帮助了很多人找到了大家需要的 PDF，其实网上有很多 PDF，大家如果在网上找不到的话，可以联系我们，大部分我们都可以找到。因 PDF 电子书都有版权，请不要随意传播，如果您有经济购买能力，请尽量购买正版。

声明：

本公司只提供代找服务，因寻找 PDF 电子书有一定难度，仅收取代找费用。如因 PDF 产生的版权纠纷，与本公司无关，我们仅仅只是帮助您寻找到您要的 PDF 而已。